

무효전력 제어에 의한 PCC전압 보상을 갖는 삼상 병렬형 능동전력필터

論 文
49B-3-12

A Three-Phase Parallel Active Power Filter Operating with PCC Voltage Compensation by Controlling Reactive Power

李 雨 哲* · 玄 東 石** · 李 宅 基***
(Woo-Cheol Lee · Dong-Seok Hyun · Taeck-Kie Lee)

Abstract - The performance and dynamic characteristics of a three-phase parallel active power filter with PCC voltage compensation is presented and analyzed in this paper. The characteristics of parallel active filter are discussed when they are applied to nonlinear loads with current source and voltage source type, the characteristics of voltage compensator and comparison of two functions are discussed. The proposed scheme in this paper employs a PWM voltage-source inverter and has two operation modes. First, it operates as a conventional active filter with reactive power compensation while PCC voltage is in a certain range. Second, it operates as a voltage compensator while PCC voltage is out of range. Finally, the validity of this scheme is investigated through analysis of simulation and experimental results for a prototype active power filter system rated at 10KVA.

Key Words : Active Power Filter(APF), Voltage Compensator, PCC (Point of Common Coupling)

1. 서 론

일반적인 계통 시스템에서 다이오드나 싸이리스터 정류기와 같은 비선형 부하의 증가는 PCC(Point of Common Coupling)지점의 전압파형의 품질을 떨어뜨리게 된다. 고조파에 관련된 문제들을 완화하기 위하여, 각 국의 전력회사들은 점차적으로 전기사용자들에게 IEEE519고조파 규정을 지키게끔 요구하고 있는데, 이 규정은 PCC지점에서의 고조파 표준 규격에 관한 것이다[1].

지금까지는 역률개선과 고조파전류를 저감할 목적으로 수동필터, 즉 저역통과필터나 고역통과필터 등이 사용되어 왔다. 그러나 이들 수동필터는 다음과 같은 단점이 있다. 첫째로, 고조파 보상효과는 AC전원측의 임피던스에 의해 영향을 받고 둘째로, 특정 주파수에서 전원측 임피던스와 수동필터 사이에 고조파 증폭이 되는 병렬 공진이 일어날 수 있고 셋째로, 수동필터는 전원 계통과 직렬 공진이 발생 할 수 있어 이로 인해 전압 왜곡이 발생되어 지나친 고조파전류가 수동필터로 흐르게 된다[2].

직렬형과 병렬형으로 구분되는 능동필터는 무효전력, 역상분, 고조파 그리고 Flicker등을 보상하도록 연구되어 왔다[3]. 종래의 능동필터는 부하의 고조파전류와 무효분도 보상할 수 있다. 그러나 선로에는 R_s, L_s 로 표현되는 유한한 값을 갖는 임피던스가 존재하여, 부하 전류가 전원측 임피던스를 통해

서 흐르는 한 PCC지점에서 전압은 파형이 왜곡되고 전압강하가 발생 할수 밖에 없다. 능동필터 시스템은 최대 5%의 전원 전압 고조파, $\pm 10\%$ 의 전압강하/상승, 10%까지의 전원전압 불평형 등과 같은 전원이나 부하상태 하에 IEEE519규정에 맞게끔 동작하게 되어있다. 따라서 PCC전압이 10%까지 강하할 경우 능동전력필터는 적절하게 동작을 할수 없게 될 수 있다. 전압강하의 경우에는 Flicker나 모터의 직입기동등이 중요한 원인이 된다. 이런 경우 선형부하의 비는 비선형 부하의 비보다 커지게 될수 있어, 고조파전류보다는 전압강하가 심각한 문제가 될 수 있다. 따라서 이 경우는 능동필터에서 PCC전압을 일정하게 유지시킬 수 있는 전압보상기 모드로 전환할 필요가 있다.

이 논문에서 제시된 APF는 이전에 사용된 것에 비해 다음과 같은 특징이 있다. 첫째로, PCC전압이 일정범위 내에 있을 때 무효전력과 고조파보상은 동기좌표내에서 부하전류를 검출하고 계산함에 의해서 이루어진다. 이리하여 손쉽게 고조파전류를 검출 할수 있다. 둘째로, PCC전압이 일정범위를 벗어날 경우 PCC전압을 일정하게 유지하기 위하여, APF 모드에서 전압보상기로 전환되어 PCC전압을 일정하게 유지시키는데 이때 유효분에 의한 전압강하도 보상되게 된다. 셋째로, APF의 성능을 향상시키기 위하여 DC전압 제어루프는 두가지 경우에 대해 모두 구현되고, 이 DC 전압제어루프는 DC커패시터 양단간의 전압을 일정하게 유지해 주어 인버터의 전압이득을 키울수 있고, 고주파의 AC전류 고조파분을 줄일수 있다. 마지막으로 제안된 알고리즘의 타당성을 입증하기 위하여 컴퓨터 시뮬레이션 및 실험을 통해 그 결과를 분석한다.

* 正 會 員 : 漢陽大 電氣工學科 博士課程

** 正 會 員 : 漢陽大 電氣工學科 教授 · 工博

*** 正 會 員 : 漢京大 電氣工學科 助教授 · 工博

接受日字 : 1999年 10月 26日

最終完了 : 2000年 1月 24日

2. 병렬형 하이브리드 능동 필터 시스템

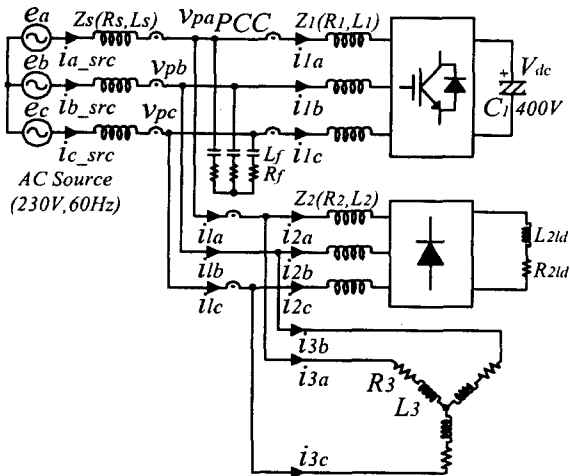


그림 1 하이브리드 병렬형 능동 필터의 구성도
Fig. 1 System configuration of a hybrid parallel active power filter.

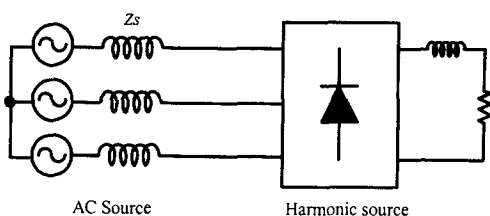
그림 1은 제안된 병렬형 APF를 나타내며, e_a, e_b, e_c 는 입력전원전압, V_{pa}, V_{pb}, V_{pc} 는 PCC전압 그리고 L_f, R_f 는 수동필터로 APF로부터 발생하는 PWM 스위칭 리플을 줄이기 위하여 설치되었다

2.1 병렬형 능동 필터 특성 해석

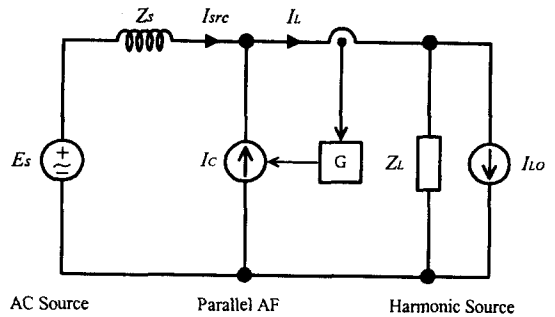
병렬형 APF는 부하측에 병렬로 PWM인버터가 위치하여 부하측의 고조파전류와 같은 양의 크기의 전류를 입력전원측에 인가해 준다. 또한 부하가 고조파 전류원인지 고조파 전압원인지에 따라 다음같이 2가지로 분리 할수 있다.

2.1.1 부하가 고조파 전류원인 경우

그림 2(a)는 고조파 전류원 부하인 일반적인 다이오드정류기를 나타내며, 충분한 크기의 DC리액터는 일정한 크기의 DC전류가 흐르게해 준다. 그림 2(b)는 고조파 전류원에 대한 병렬형 APF의 보상기본원리를 보여준다. 여기서 Z_s 는 전원측 임피던스, I_{Lo} 는 등가고조파 전류원, Z_L 는 부하측의 등가 임피던스, G 는 APF의 등가 전달함수이며, 여기서는 제어회로의 지연이 포함된다. 일반적으로 G 는 기본파에 대해서 $|G|_f=0$ 이고, 고조파에서 $|G|_h=1$ 이다[3].



(a)



(b)

그림 2 고조파 전류 원인 경우 병렬형 능동필터의 기본원리

- (a) 부하가 고조파 전류원인 경우
- (b) 고조파 전류원에 대한 APF기본원리

Fig. 2 Basic principle of parallel active filter for harmonic current source.

- (a) Typical current-source type of harmonic source.
- (b) Basic principle of parallel APF for harmonic current source.

- (a) Typical current-source type of harmonic source.
- (b) Basic principle of parallel APF for harmonic current source.

2.1.2 부하가 고조파 전압원인 경우

그림 3(a) 고조파 전압원 부하인 DC 커패시터가 존재하는 다이오드정류기를 나타내고, 그림 3(b)는 이에 대한 병렬형 APF의 보상 기본원리를 보여준다. 이 그림으로부터 다음 방정식을 얻어 낼 수가 있다.

$$I_C = G I_L \tag{1}$$

$$I_{src} = \frac{E_S - V_L}{Z_s + Z_L / (1 - G)} \tag{2}$$

$$I_L = \frac{1}{1 - G} \frac{E_S - V_L}{Z_s + Z_L / (1 - G)} = \frac{E_S - V_L}{(1 - G)Z_s + Z_L} \tag{3}$$

따라서 다음 식이 만족될 때,

$$\left| Z_s + \frac{Z_L}{1 - G} \right|_h \gg 1 \tag{4}$$

전원 측 전류는 정현파가 된다. 즉

$$I_C = I_{Lh} \tag{5}$$

$$I_{sh} \approx 0 \tag{6}$$

$$I_{Lh} \approx \frac{V_{Sh} - V_{Lh}}{Z_L} \tag{7}$$

식 (4)는 부하가 고조파 전압원인 경우 병렬형 APF가 부하측 고조파를 없애기 위한 동작조건이 된다.

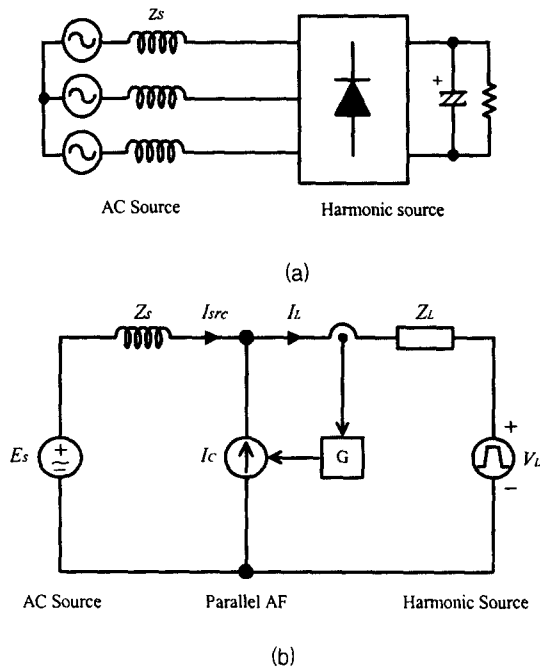


그림 3 고조파 전압 원인 경우 병렬형 능동필터의 기본원리
(a) 부하가 고조파 전압원인 경우
(b) 고조파 전압원에 대한 APF기본원리

Fig. 3 Basic principle of parallel active filter for harmonic voltage source.
(a) Typical voltage-source type of harmonic source.
(b) Basic principle of parallel APF for harmonic voltage source.

그러나 병렬형 APF인 경우 식(4)을 만족하기는 어렵다. 왜냐하면 고조파 전압원은 극히 작은 내부 임피던스를 갖기 때문이고, 예를들어 큰 전해 커패시터를 갖는 다이오드정류기에서 직렬리액터가 정류기의 AC단에 설치되지 않은 경우 $|Z_L \approx 0|$ 이어서 식 (4)는 전원측 임피던스 Z_S 만으로 만족시킬 수 없기 때문이다. 이런 경우 직렬형 APF의 사용이 요구된다[4]. 본 논문에서는 부하가 고조파 전류원이 경우에 대하여 고조파를 줄이기 위하여 병렬형 APF를 선정한다.

2.1.3 병렬형 능동 필터

병렬형 APF의 등가 전달 함수 G 는 다음 식으로 나타낼 수 있다[4].

$$G(S) = k G_n e^{-\tau s} \frac{\omega_0}{s + \omega_0} \quad (8)$$

이 식에서 k 는 등가 Gain($k=1 \pm 0.01 \sim 1 \pm 0.1$, 전류 검출과 제어에서의 에러를 나타냄), G_n 은 고조파 전류 검출회로의 등가 전달 함수이고, 이는 실험 시 차단 주파수 $f_c=30\text{Hz}$ 인 1차 high pass 필터를 나타내고, 이 필터는 동기 좌표계에서 사용된다[5]. τ 는 제어 회로에서의 지연 시간을 나타낸다. $\omega_0/(s + \omega_0)$ 는 제어 회로에서 사용되는 절연 증폭기의 전달

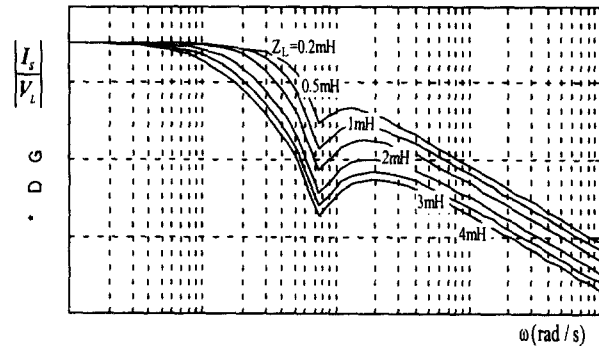


그림 4 고조파 전압원인 경우 임피던스(Z_2)에 따른 하이브리드 병렬형 능동 필터의 보상 특성
Fig. 4 Compensation characteristics of a hybrid parallel active filter for a voltage source with different impedance.

함수이다. 보상 특성은 다음의 방정식을 통하여 얻어진다.

$$\left| \frac{I_{src}}{V_L} \right|_{\omega=\omega_0} = \left| \frac{1}{Z_S/(1-G)} \right| \quad (9)$$

그림 4는 식 (18)로 계산된 값을 보여주며, 병렬형 APF에서는 부하 임피던스(Z_2)가 작으면 작을수록 보상 특성이 저하됨을 보여 준다.

2.2 PCC 전압 보상기

2.2.1 전압 보상기가 없을 경우 PCC 전압

그림 5는 부하와 전원시스템의 등가회로를 나타낸다[6]. 모선과 PCC전압 사이의 전압을 ΔV 라고 하면

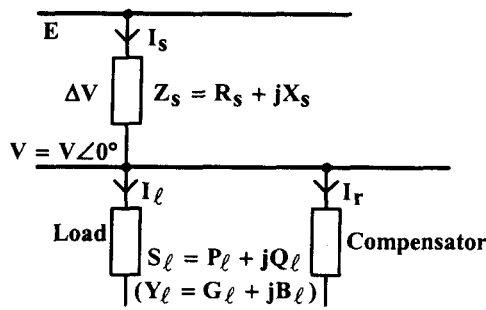
$$\Delta V = E - V = Z_S I_L \quad (10)$$

$Z_S = R_S + jX_S$ 이고, 식(20)으로부터

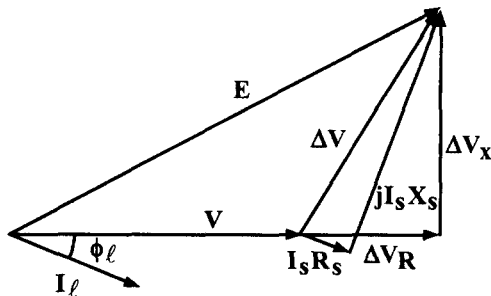
$$I_L = \frac{P_L - jQ_L}{V} \quad (11)$$

$$\begin{aligned} \Delta V &= (R_S + jX_S) \left(\frac{P_L - jQ_L}{V} \right) \\ &= \frac{(R_S P_L + X_S Q_L)}{V} + j \frac{(X_S P_L - R_S Q_L)}{V} \\ &= \Delta V_R + \Delta V_X \end{aligned} \quad (12)$$

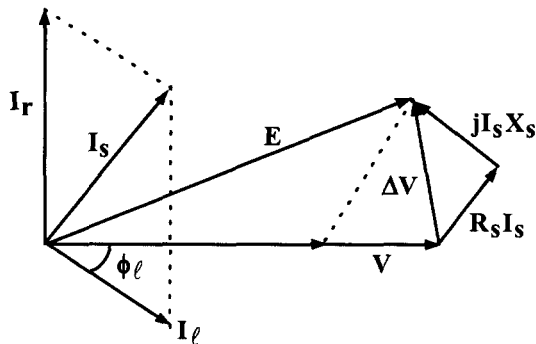
전압 ΔV 는 그림 5(b)에서 알수 있듯이 ΔV_R 과 ΔV_X 에의 해 변화하게 되며, 이에따라 PCC전압 역시 부하전류의 위상과 진폭에 따라 변화하게됨을 알 수 있다. 즉 전압강하는 부하측의 유효, 무효전력에 따라 결정된다는 것을 알 수 있다. 전압 ΔV 는 다음처럼 표현 할 수 있다.



(a)



(b)



(c)

그림 5 등가 회로와 벡터 선도

- (a) 부하와 전원 계통의 등가 회로
- (b) 전압 보상기가 없을 때 벡터도
- (c) 전압 보상기가 있을 때 벡터도

Fig. 5 Equivalent circuit and vector diagram.

- (a) Equivalent circuit of load and supply system.
- (b) Vector diagram without voltage compensator.
- (c) Vector diagram with voltage compensator.

$$\Delta V = I_s R_s + j I_s X_s$$

보상기가 없을 경우 선로전류 I_s 와 부하전류 I_l 은 같게된다.

2.2.2 전압 보상기가 있을 경우 PCC 전압

그림 5(c)는 전압보상기의 벡터선도를 나타낸다. 보상기를

병렬로 부하에 설치함으로써 보상기의 전류를 조절함에 의해 $|E|=|V|$ 가 되도록 만들 수 있다. 이때 부하측의 무효분 전류보다 많은 양의 무효분 전류를 전압보상기가 보상하게되는데 이는 무효분 뿐만 아니라 유효분에 의한 전압강하도 보상하기 때문이다.

$$I_s = I_L + I_R \quad (I_R: \text{보상기 전류}) \quad (13)$$

그러나 선로전압 E 와 V 사이의 위상차가 존재하게 된다.

2.2.3 무효전력 보상을 하는 APF와 전압 보상기의 비교

APF는 비선형부하에서 발생하는 고조파전류와 무효전력 성분을 보상함으로써, 역률을 제어 할수 있다. 무효전력보상은 부하전류를 검출하여 무효분을 계산해 뺌으로써 행해지게 된다. 비록 무효전력은 APF에 의해서 보상은 되지만, 선로 임피던스로 인해 PCC전압은 떨어지게 된다. 전압보상기는 보상기의 전류를 제어함에 의해서 $|E|=|V|$ 로 만들 수가 있으나, 전압 E 와 V 사이의 위상각은 커지게 된다. 이때 전압보상기는 무효분전류를 이용하여 부하측전류의 무효/유효분 전류에 의한 전압강하를 보상하고, 전압보상기의 유효분전류는 DC link전압을 일정하게 유지하기위한 최소한의 전류가 흐르므로 보상기의 무효분전류가 이 장치의 용량을 결정한다고 말할 수가 있다. 그림 6은 이 두가지 기능이 동시에 만족 될 수 없음을 보여 준다. 즉 PCC전압 보상을 위한 벡터도는 I_r, I_s, E 로 설명이 되는데 보상기전류 I_r 의 크기 조정으로 I_s 의 크기와 위상을 조절하여 $|E|=|V|$ 가 되도록 제어한다. 또한 무효전류를 보상을 하는 APF벡터도는 I_r', I_s', E' 로 설명이 되는데, 보상기전류 I_r' 의 크기조정으로 I_s' 와 V 가 동상이 되도록 제어한다. 만약 PCC전압이 일정범위 내에 있는 경우, 본 제어기는 APF로 동작하고, PCC전압이 일정범위를 벗어날 경우 전압보상기로 동작한다. 예를들어 모터가 특별한 기동장치 없이 직입기동을 할경우 부하전류는 급격히 증가하게 되어 PCC전압이 일정범위를 벗어나는 경우가 발생 할수가 있고, 또한 이 경우는 선형부하와 비선형부하가 같이 존재하며, 선형부하가 차지하는 비율이 비선형 부하보다 더 커질 수가 있다.

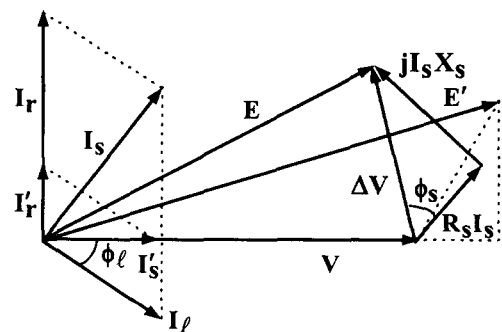


그림 6 능동필터와 전압 보상기 기능 비교 벡터도

Fig. 6 Vector diagram of compensation between APF and voltage compensator.

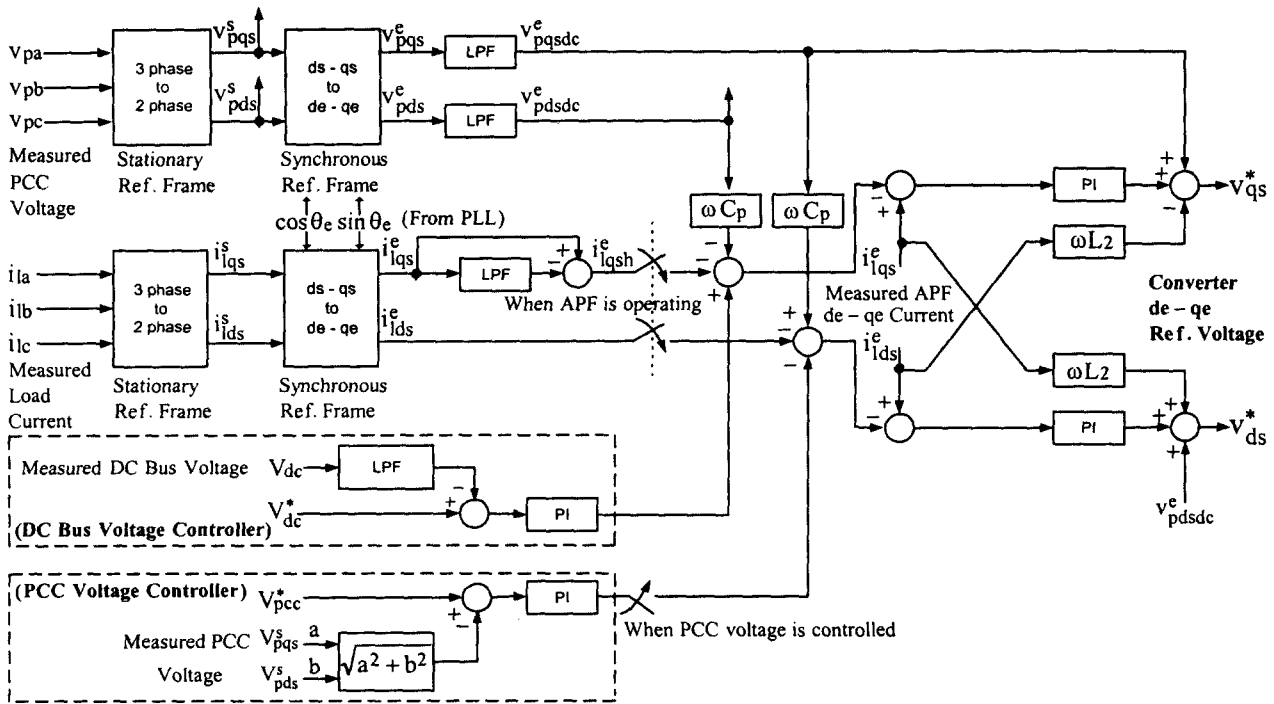


그림 7 능동전력필터에 대한 동기 좌표계에서의 제어기 구성
 Fig. 7 Synchronous reference frame controller for a APF.

이런 경우 APF는 전압보상기로 동작되며 고조파전류를 보상하지 않더라도 고조파저감의 효과를 볼수가 있다. 일단 모터가 기동하여 PCC전압이 일정범위에 있게되면 제어기는 APF 모드로 전환하게 된다.

3. 병렬형 능동 필터 구현

그림 7은 APF가 동기좌표계에서 구현되었음을 보여주며, 전류 및 전압검출부, DC 전압제어부, PCC전압제어부와 전류 제어부로 구성된다[7][8].

3.1 부하 전류와 PCC 전압의 보상

부하전류는 동기좌표계 d^e-q^e 축에서 측정되고, 검출된다. 이들 전류는 d^e-q^e 축에서 DC양으로 검출되기 때문에, 저역통과필터(LPF)를 거친 전류값은 위상에러가 발생하지 않는다. 부하전류중 고조파분을 동기좌표계 d^e-q^e 축에서 검출하기 위하여 (1-LPF)의 형태로 고역통과필터를 구성하였다. 이 제어기에 사용된 저역통과필터의 차단주파수는 10Hz로 선정하였다. 그러나 동기좌표계 d^e-q^e 축에서 d축전류, i_{ds}^e 는 LPF에 의해서 필터링되지 않았는데 이는 무효전력과 고조파전류를 같이 공급하기 위해서이다. 입력필터 R_f, C_f 는 인버터에 의해서 발생하는 스위칭리플을 줄이기 위하여 필요하나, 이 필터에 의해 발생하는 위상문제는 보상되어야 한다. 본 논문에서는 입력필터 R_f, C_f 에 대한 위상보상은 C_f 에 의한 영향만을 고려하였는데 이는 임피던스비가 $Z_R \ll Z_C$ 이기 때문이다.

3.2 DC 전압 제어

DC전압제어기는 DC전압을 제어하기 위한 유효전력과 인버터손실을 보상하기 위한 q축분 전류 지령치를 발생시킨다. 측정된 DC값 V_{dc} 는 제어를 위하여 사용되는데, AC리플 성분을 줄이기 위하여 필터링 된다. V_{dc} 에 존재하는 AC의 주성분은 360Hz와 그것의 배수성분이다. 만약 DC전압 제어루프에서 AC리플 성분이 경감되지 않는다면, 이리인해 DC단에 존재하는 AC성분을 제거하기 위하여 고조파전류 지령치를 발생시킬 것이다. AC를 포함한 V_{dc} 값은 DC커패시터 C_f 값에 따라 달라지며, 이 값은 차단주파수가 150Hz인 LPF필터에 의해서 한번 더 필터링 되 360Hz성분과 그것의 배수성분을 경감시킨다.

전압불평형인 경우, APF에서 발생하는 기본파 역상분전류는 120Hz리플분으로 나타난다. 따라서 120Hz V_{dc} 성분은 검출 제어되어 APF전류 제어시 역효과가 최소화되도록 한다. 따라서 LPF의 차단 주파수는 150Hz로 정했다.

3.3 PCC 전압 제어기

만약 PCC전압이 일정전압이하로 떨어지게 될 경우 APF는 APF에서 PCC전압보상모드로 전환하게된다. 그러나 APF에서 APF로 동작할 때와 PCC전압 보상기로 동작 시 전류 제어기 내의 PI Gain값은 서로 상이한 값을 사용해야 하므로, 이리인해 동작모드 전환 시 과도상태를 발생하게 되는데, Power부에서 수동소자 특히 리액터의 존재로 실제응답은 과도상태에 의해서 많은 영향을 받지 않게 된다. 그러나 전류

표 1 시스템 파라메터
TABLE 1 SYSTEM PARAMETER.

파라메터	설정치
선로 전압(e_a, e_b, e_c)	230V, 60Hz
선로 임피던스(R_s, L_s)	$0.3\Omega, 1mH$
입력 필터(R_f, C_f)	$2\Omega, 100\mu F$
입력 임피던스(L_1)	1.3mH
입력 임피던스(L_2)	0
DC 커패시터(C_1)	14,800 μF
DC 커패시터(C_2)	0
비선형 부하(R_{2d})	$16\Omega, 150\mu H$
선형 부하(R_3, L_3)	$3\Omega, 9mH$
DC 전압(V_{dc})	400V _{dc}

제어기로서 예측전류제어기나 히스테리시스제어기를 사용하면 Gain Tuning의 문제를 해결 할수 있다.

4. Simulation 결과

제안된 APF는 Simulation Tool인 ACSL (Advanced Continuous Simulation Language)를 사용하여 시행하였다. 시스템 파라메터는 표 1에 나타나 있다. 입력 임피던스 R_s, L_s 는 임피던스 비가 50대 50을 갖게끔 설계를 하였으며, 그 값은 적은 용량의 인버터로 PCC전압강하 효과를 보기 위하여 실제값 보다 큰값으로 선정하였다.

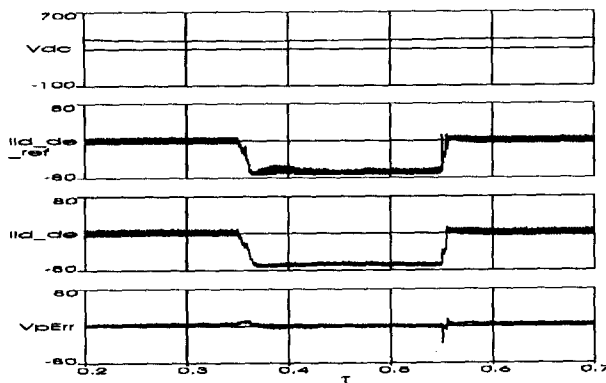
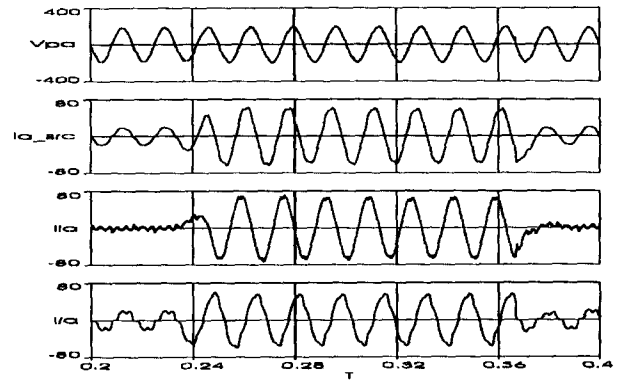
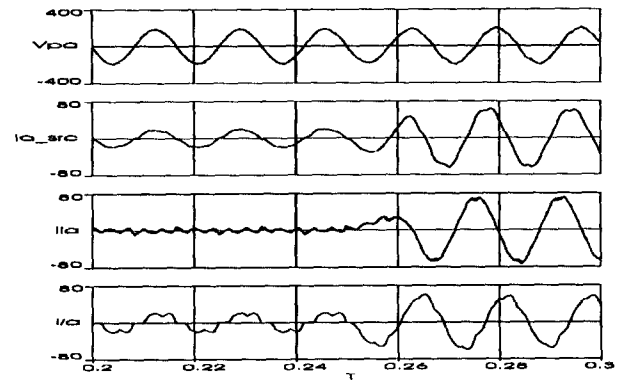


그림 8 부하가 다이오드 정류 부하에서 선형 부하가 추가 되고, 제거되었을 때 하이브리드 능동 필터 응답
(V_{dc} : 하이브리드 능동 필터에서의 DC 전압
 i_{1d_ref} : 무효 전류 지령치, i_{1d} : 부하측 무효전류
 V_{pErr} : PCC전압 오차)

Fig. 8 Hybrid active filter response when load is changing from diode to diode and linear load.
(V_{dc} : DC link voltage in hybrid APF.
 i_{1d_ref} : reference of reactive current.
 i_{1d} : reactive current of load.
 V_{pErr} : Error of PCC voltage.)



(a)



(b)

그림 9 부하가 다이오드 정류부하에서 비 선형 부하가 추가,제거되었을 때 하이브리드 능동필터의 응답 특성

(V_{PA} : a상 PCC 전압, i_{a_src} : a상 전원 전류
 i_{ia} : a상 하이브리드 능동필터 전류
 i_{ia} : a상 부하 전류)

(a) 시간 축이 40msec/div일 때 (b) 20msec/div일때

Fig. 9 Hybrid active filter response when load is changing from diode to diode and linear load.

(V_{PA} : PCC voltage of phase a.
 i_{a_src} : source current of phase a.
 i_{ia} : hybrid APF current of a.
 i_{ia} : load current of phase a.)

(a) time scale is 40msec/div (b) 20msec/div

그림 8, 9는 부하가 순수 다이오드부하에서 선형부하가 추가, 제거되었을 때의 APF의 응답특성을 나타낸다. 다이오드 부하로는 저항을 부하로 갖는 다이오드정류기가 사용되었는데, 고조파 전류원 부하로 만들기 위하여 다이오드정류기의 출력에 커패시터, 리액터(C_2, R_2)를 사용하는 대신 저항만으로 이루어진 다이오드 정류기로 구성하였다. 선형부하로는 저항과 리액터(R_3, L_3)를 Y결선으로 사용하였는데, 이는 역률 0.6을 갖는 모터의 등가모델을 구현한것이다.

그림 8은 APF 무효전류가 지령치를 잘 추종함을 보여준다. 그림 9(a)는 다이오드 정류기부하가 PCC전압에 연결될때 PCC전압강하는 그다지 많지 않아 APF는 APF로 계속 동작하게 되어, 전원전류는 고역률과 보다 적은 고조파분을 포함

하도록 제어된다. 또한 선형부하가 동시에 인가되었을 때는 PCC전압강하는 심각해 APF는 전압보상기로 동작을 함을 보여준다. 따라서 PCC전압은 일정하게 유지되나, 전원전류는 진상이 된다. 그림 9(b)는 그림 9(a)와 똑같은 파형을 나타내며 시간 스케일만 40msec에서 20msec로 확대했다.

5. 실험 결과

병렬형 APF를 구현하기 위하여 명령어 수행시간이 60nsec인 32 bit floating point DSP가 사용되었고, IGBT소자를 사용한 prototype 10 KVA인버터가 사용되었다. PWM스위칭 주기는 150usec이다. 그림 10은 어떤 보상도 하지 않은 경우, PCC선간 전압파형으로, 부하변동에 따른 전압강하를 보여주고 있다. 비록 아무런 부하도 연결되지 않은 경우에도 전원전류 i_{a_src} 가 존재하는 이유는 필터 L, C 때문이다. 다이오드 정류부하가 연결되었을 때 부하전류는 대부분 q축분만 흐르게 되고, PCC전압은 다소간 떨어지게 되고, 선형부하가 추가되었을 때는 부하전류는 q축분과 d축분이 함께 흐르게 되고 PCC전압이 심하게 떨어짐을 알 수 있다. (약 13% 전압강하, 235Vrms → 204Vrms)

그림 11, 12는 시뮬레이션 결과 그림 8, 9과 유사한 결과를 보여주며, 특히 전압보상기모드로 동작시 정상전압의 약 95%까지 보상됨을 확인하였다. (약 2.5% 전압강하, 235Vrms → 229Vrms)

그림 13(a)는 다이오드정류기 부하만 인가되어 APF가 고조파보상 모드로 동작시 전원전류의 FFT분석 결과이며 이때 THD 약 6.94%이며, 그림 13(b)는 선형부하가 추가로 인가되었을 경우로 이때 선형부하가 차지하는 비율이 비선형 부하보다 커 전원전류 파형은 그림 13(a)보다 깨끗하게 되며 THD는 약 4.74%이다.

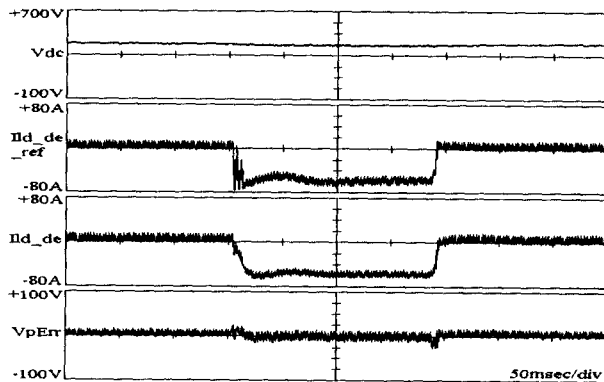


그림 11 부하가 다이오드 정류 부하에서 선형 부하가 추가, 제거되었을 때 하이브리드 능동 필터 응답 (V_{dc} : 하이브리드 능동 필터에서의 DC 전압, $i_{ld_de_ref}$: 무효 전류 지령치, i_{ld_de} : 부하 축 무효전류, V_{pErr} : PCC전압 오차)

Fig. 11 Hybrid active filter response when load is changing from diode to diode and linear load.

(V_{dc} : DC link voltage in hybrid APF.

$i_{ld_de_ref}$: reference of reactive current.

i_{ld_de} : reactive current of load.

V_{pErr} : Error of PCC voltage.)

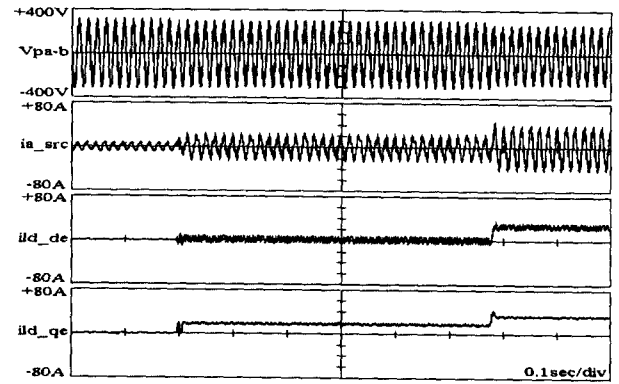


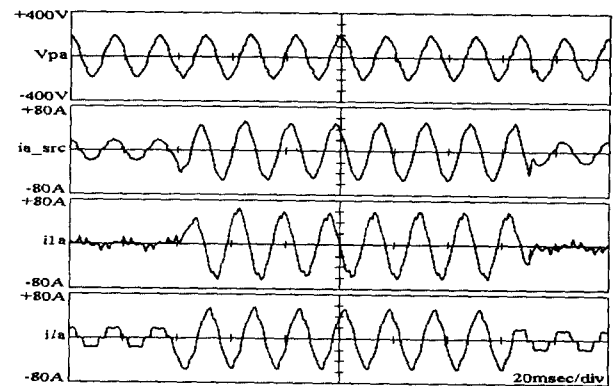
그림 10 하이브리드 APF가 없을 때 다이오드 정류부하에서 선형 부하가 추가 되었을 때

(V_{pa-b} : PCC 선간 전압, i_{a_src} : a상 전원 전류

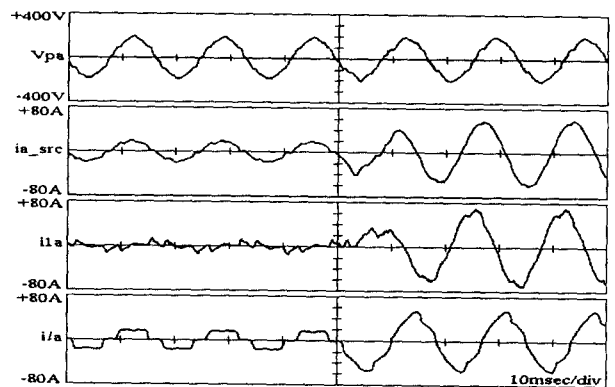
i_{ld_de} : 동기 좌표계에서 d축 부하 전류

i_{ld_qe} : 동기 좌표계에서 q축 부하 전류)

Fig. 10 PCC voltage variation when load is changing from diode rectifier to linear load with out hybrid active filter.



(a)



(b)

그림 12 부하가 다이오드 정류부하에서 비 선형 부하가 추가, 제거되었을 때 하이브리드 능동필터의 응답 특성 (V_{PA} : a상 PCC 전압, i_{a_src} : a상 전원 전류, i_{ia} : a상 하이브리드 능동필터 전류, i_a : a상 부하 전류) (a) 40msec/div일때 (b) 20msec/div일때

Fig. 12 Hybrid active filter response when load is changing from diode to diode and linear load.

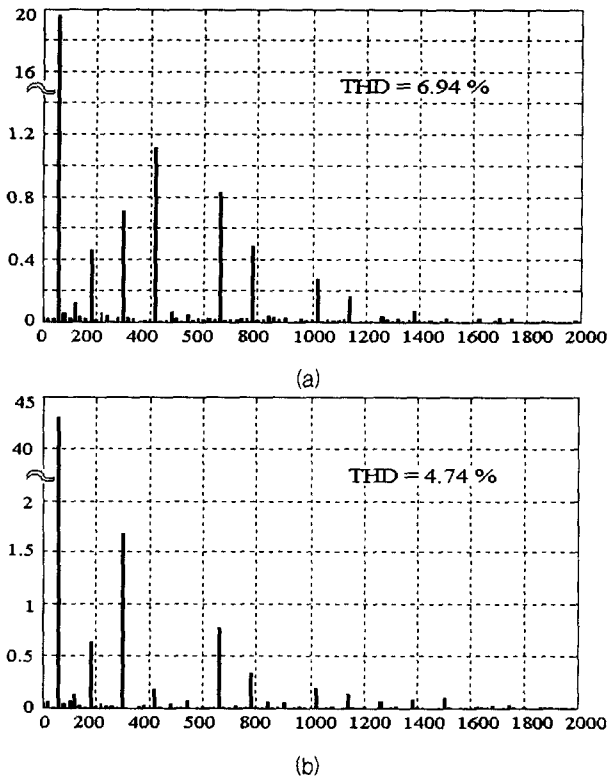


그림 13 전원전류의 고조파분석

(a) 능동필터가 고조파보상 모드로 동작시 (b) 능동필터가 전압보상기 모드로 동작시

Fig. 13 The spectrum of source current.

6. 결 론

본 논문은 PCC전압 보상기능을 갖는 삼상 병렬형 능동필터를 제안하였고, 병렬형 APF와 전압보상기 기능을 비교 고찰하였다. 제안된 방법은 2가지 동작모드를 갖는다. 첫째로, PCC전압이 일정범위 내에 있을 때 능동필터는 무효전력 보상기능을 갖는 APF로 동작을 한다. 둘째로, PCC전압이 일정범위를 벗어날 때 전압 보상기로 동작한다. 제안된 방법의 타당성을 입증하기 위하여 시뮬레이션 및 실험결과로 분석을 하였으며, 2가지 결과가 잘 일치됨을 보였다. 추후 예측 전류 제어기와 히스테리시스 전류제어기의 사용과 입력전압 또는 부하전류가 불평형일 때도 연구가 될 것이다.

참 고 문 헌

[1] S. Bhattachaya and D. M. Divan, "Synchronous frame based controller implementation for a hybrid series active filter system,"IEEE Annu. Meeting, 1995, pp. 2531-2540.
 [2] L.A. Mohan, J.W. Dixon, R.R.Wallace,"A Three-Phase Active Power Filter Operating With Fixed Switching Frequency for Reactive Power and Current Harmonic Compensation,"IEEE Trans. On Ind. Elec., vol. 42, no. 4, pp. 402-408, August 1995.
 [3] F.Z.Peng,"Application Issues of Active Power Filters,"IEEE

Industry Applications Magazine, vol. 4, no.5, pp. 263-268, May 1994.

[4] H. Akagi,"Trend in Active Power Filters,"IEEE Trans. On Power Electronics, vol 9, no.3, pp. 263-268, May 1994.
 [5] F. Z. Peng, H. Akagi, and A.Nabae, "Compensation characteristics of the combined system of shunt passive and series active filters,"IEEE/IAS Annu. Meeting, 1989, pp. 959-966.
 [6] T. J. E. Miller, Reactive Power Control in Electric Systems, John Wiley & Sons, a Wiley-Interscience Publication, 1982.
 [7] S. Bhattacharya, T.M. Divan, and B. Banerjee,"Parallel Active Filter System Implementation and Design Issues for Utility Interface of Adjustable Speed Drive Systems,"IEEE/IAS Annu.Meeting, 1996, pp. 1032-1039.
 [8] Schauder, CD., and Mehta, H., "Vector Analysis and Control of Advanced Static Var Compensators," IEE Fifth International Conference on AC and DC Transmission, London, Conference Publication No. 345, pp. 266-272, 1991.

저 자 소 개



이우철 (李雨哲)

1964년 3월 24일생. 1987년 한양대 전기공학과 졸업(학사). 1989년 동 대학원 졸업(석사). 1988~1998 효성중공업(주) 기술연구소 근무. 1995~현재 동 대학원 박사과정. Tel : 02-2290-0341

E-mail : woorchul@hymail.hanyang.ac.kr



현동석 (玄東石)

1950년 4월 8일생. 1973년 한양대 공대 전기공학과 졸업. 1978년 동 대학원 전기공학과 졸업(석사). 1986년 서울대 대학원 전기공학과 졸업(공학박). 1984년~1985년 미국 토레도대학 교환교수. 1988년~1989년 원연 공과대학 교환교수. 현재 한양대 공대 전기전자공학과 교수.

Tel : 02-2290-0345

E-mail : dshyun@email.hanyang.ac.kr



이택기 (李宅基)

1963년 9월 4일생. 1987년 한양대 전기공학과 졸업(학사). 1989년 동 대학원 졸업(석사). 1993년 동 대학원 졸업(공학박). 1994년~1996년 서남대 전기공학과 전임 강사. 1996년~현재 한경대 전기공학과 조교수.

Tel : 0334-670-5292

E-mail : tklee@hnu.hankyong.ac.kr