

단일 전류센서를 갖는 저가의 단상 반브릿지 능동전력필터

金羲重, 韓炳文, 朴溶植

Low-cost Single-Phase Half-bridge Active Power Filter with One Current Sensor

Hee-Joong Kim, Byung-Moon Han, Young-Sik Park

요 약

본 논문에서는 간단한 제어회로와 반브릿지 PWM 인버터로 구성된 저가의 단상능동전력필터에 대해 기술하고 있다. 이 능동전력필터의 성능을 확인하기 위하여 EMTP 프로그램에 의한 시뮬레이션을 실시하고 프로토타입을 제작하여 실험을 실시하였는데, 그 결과 제안하는 능동전력필터는 단상비선형부하가 발생하는 고조파를 제거하는데 우수한 성능을 갖고 있음을 확인할 수 있었다. 제안된 시스템은 반브릿지 인버터와 단일 전류센서를 사용한 간단한 제어회로로 구성되었기 때문에, 하드웨어 비용이 저렴하고 프러그인 타입으로 제작 가능한 장점을 갖는다.

ABSTRACT

This paper describes a low-cost single-phase active power filter, which consists of a half-bridge PWM inverter with a simple control circuit. In order to verify the performance of proposed active power filter, many computer simulations with EMTP codes and experimental works with a hardware prototype were done. Both results confirm that the proposed active power filter shows excellent performance to eliminate the harmonics generated in the single-phase non-linear load. The active power filter has advantage of low implementation cost and compact size, using a half-bridge inverter and a simple control circuit with only one current sensor. So, it can be fabricated as a plug-in type.

Key Words: PWM, EMTP, P-I, d-q

1. 서 론

최근 전력전자기기의 사용이 급증하면서 이들 기기에서 발생하는 고조파전류가 심각한 문제로 대두되어 있다. 이들 고조파전류는 배전계통의 전압 파형을 왜곡시켜 변전소의 변압기를 과열시키고, 연계된 타부하에 악영향을 주며, 인접한 통신선로에는 자기유도에 의한 장애를 유발한다. 능동전력필터는 이들 전류고조파를 제거하는 동시에 무효전력을 보상하는 장비로 많은 연구자에 의해 개발되어 왔다.^[1~4]

능동전력필터는 직류단에 결합된 에너지저장요소에 따라 크게 전압원과 전류원으로 구분되는데 전압원의 경우는 캐패시터를 그리고 전류원의 경우는 인덕터를 에너지저장요소로

사용한다. 현재의 기술수준으로는 캐패시터가 인덕터보다 효율이 높아 전압원이 주로 실용화 대상이 되고 있다.

능동전력필터는 비선형부하와 병렬로 연결되고 비선형부하에서 요구되는 고조파전류를 공급하여 전원단에서는 전원전압과 동상인 정현파 성분만 공급하도록 동작하는 전력전자기기이다. 능동전력필터가 고조파성분 전류만 공급하기 위해 통상 사용하는 제어방식은 부하 측의 전류를 측정하여 기본파성분을 제거하고 고조파성분만 추출하여 이를 기준신호로 능동전력필터의 출력전류를 추종시키는 것이다. 따라서 단상 능동전력필터의 경우 2개의 전류센서를 필요로 하며 능동전력필터의 손실을 보상하기 위해 전압센서로 직류단 전압을 측정하여 일정 기준치에 추종시키는 것이 필요하다.

본 논문에서는 이상 설명한 방식과는 달리 하나의 전류센서로 전원측 전류를 측정하고 두개의 전압센서를 이용하여 직류단의 전압과 연계점의 교류전압을 측정하여 능동전력필터의 출력전류를 제어하는 원리를 시뮬레이션으로 확인하고 이를 이용한 저가의 단상능동전력필터를 제작하여 성능을 시험한 결과를 기술한다.

2. 능동전력필터의 원리

그림 1은 전압원 능동전력필터의 원리를 나타낸 것이다. 이 그림에서 능동전력필터는 비선형부하에서 요구되는 고조파 전류 $i_L(t)$ 를 공급하여 전원전류 $i_s(t)$ 는 정현에 가까운 파형을 갖도록 하는 것이다. 이를 위해서 통상은 부하전류를 측정하여 기본파성분을 제거한 후 나머지 고조파성분을 능동전력필터의 기준치로 제어기에 입력하여 능동전력필터의 출력전류를 이에 추종시키는 것이다.

능동전력필터의 기능은 비선형부하로 인해 발생하는 고조파전류를 보상함과 동시에 전원전류를 항상 전원전압과 동상인 정현파로 만드는 것이다. 이때 전원전압을 정현파로 가정하면 다음 식과 같이 나타낼 수 있다.

$$v_s(t) = V_{sm} \sin \omega t \tag{1}$$

여기서, V_{sm} 은 전원 전압의 최대값이다.

비선형부하로 인해 부하전류는 기본파성분과 고조파성분의 합으로 이루어진 전류가 흐르게 되므로 다음 식과 같이 표현된다.

$$i_L(t) = \sum_{n=1}^{\infty} I_{Ln} \sin(n\omega t + \theta_n) \tag{2}$$

따라서 부하에서 소모되는 순시전력은 다음 식과 같이 표현된다.

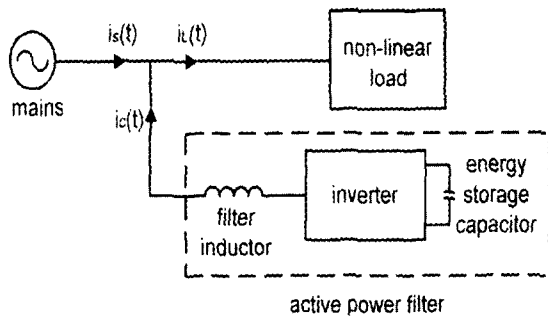


그림 1 능동전력필터의 원리
Fig. 1 Principle of active power filter

$$p_L(t) = v_s(t)i_L(t) = I_{L1}V_{sm} \cos \theta_1 \sin^2 \omega t + I_{L1}V_{sm} \sin \theta_1 \sin \omega t \cos \omega t + \sum_{n=2}^{\infty} I_{Ln}V_{sm} \sin \omega t \sin(n\omega t + \theta_n) \tag{3}$$

$$p_s(t) = I_{L1}V_{sm} \cos \theta_1 \sin^2 \omega t \tag{4}$$

$$p_c(t) = I_{L1}V_{sm} \sin \theta_1 \sin \omega t \cos \omega t + \sum_{n=2}^{\infty} I_{Ln}V_{sm} \sin \omega t \sin(n\omega t + \theta_n) \tag{5}$$

여기서, $p_s(t)$ 은 부하전류 중 기본파에 의한 유효성분이고, $p_c(t)$ 은 기본파와 고조파에 의한 무효성분을 나타낸다. 능동전력필터가 선로에 무효성분 $p_c(t)$ 를 공급하므로 입력전원은 부하에 유효성분 $p_s(t)$ 만을 공급하게 된다. 따라서 입력전원에서 공급되는 전원전류는 다음과 같다.

$$i_s(t) = \frac{P_s(t)}{v_s(t)} = I_{L1} \cos \theta_1 \sin \omega t = I_{sm} \sin \omega t \tag{6}$$

여기서, I_{sm} 은 전원전류의 최대값을 나타내며, 전원전압과 동상임과 동시에 정현파 형태를 갖는다.

이때 능동전력필터가 보상해야할 전류는 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$i_c(t) = i_L(t) - i_s(t) \tag{7}$$

따라서 앞에서 설명한 것처럼 부하전류를 감지하여 기본파성분을 제외한 고조파성분을 추출하여 능동전력필터가 보상해야 할 기준전류 i_c 로 하여 실제 출력전류를 감지하여 이에 추종시키면 전원전류 i_s 는 전원전압과 동상인 정현파 전류가 된다.

이상적인 경우 능동전력필터는 자체가 소모하는 전력이 영이나 실제의 경우 스위칭손실과 커패시터의 손실이 있으므로 약간의 유효전력을 전원에서 공급해야 한다. 만일 유효전력이 전원에서 공급되지 않으면 직류단 전압은 감소하여

고조파 보상이 불가능하다. 이 문제를 해결하기 위해 능동전력필터에는 직류전압을 일정하게 유지하는 제어가 포함되어 있다.

3. 단일 전류센서 능동전력필터

앞절에서 동작원리를 설명한 단상 능동전력필터의 경우 부하전류와 인버터출력전류를 검출하기 위한 두 개의 전류센서, 직류단전압과 전원전압을 검출하기 위한 두 개의 전압센서를 필요로 한다. 그렇기 때문에 하드웨어 비용이 높고 제어

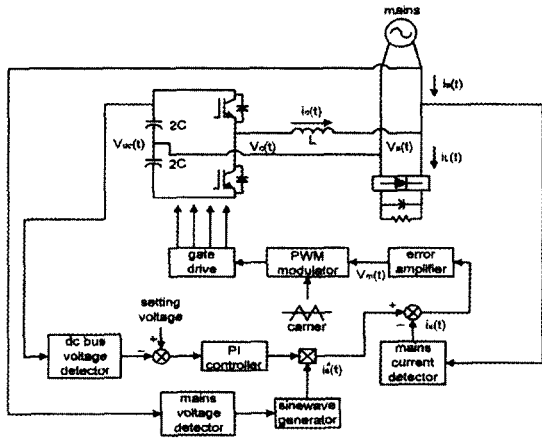


그림 2 시스템의 구성
Fig. 2 System configuration

가 복잡한 단점을 갖는다. 그러나 단상 능동전력필터의 경우 소용량으로 부하와 근접한 위치에 설치되고 높은 신뢰도와 낮은 하드웨어비용이 요구된다.^[5-7]

그림 2는 본 논문에서 제안하는 능동전력필터의 구조와 제어블록다이어그램을 나타낸 것이다. 능동전력필터의 인버터는 반브릿지를 사용하고 있으며 전원전압, 직류단전압, 전원전류의 3개 신호가 센서로 측정되어 제어입력변수로 사용된다. 전원전압은 이와 동기된 단위 크기의 기준정현파를 발생하는데 사용되고, 직류단전압은 전력평형에 관한 정보를 제공하는데 사용되며, 전원전류는 파형과 위상정보를 제공한다.

그림에 보인 제어기의 동작을 설명하면 다음과 같다. 검출된 직류단전압은 미리 설정된 전압과 비교되어 그 결과는 요구되는 전원전류의 크기를 설정하기 위해 P-I제어기로 보내진다. P-I제어기의 출력과 단위 크기의 기준정현파는 기준전원전류 $i^*(t)$ 를 발생하기 위해 곱셈기에 보내져 연산된다. 따라서 기준전원전류 $i^*(t)$ 는 정현파이면서 전원전압과 동상이 되며 감지된 실제 전원전류를 이 기준전원전류에 추종시키기 위해 두 전류의 차를 감지하여 증폭기로 증폭한 후 PWM 변조기로 보낸다. PWM 변조기에서는 이 신호와 삼각반송파를 비교하여 인버터게이트에 공급할 펄스를 발생한다.

제안하는 시스템은 능동전력필터의 인버터로 반브릿지 IGBT회로를 사용하며, 두 개의 전류센서 대신 하나의 전류센서를 사용하고 또한 제어기의 구성이 간단하여 전체적으로 하드웨어 비용이 대폭 감소한다. 단상 능동전력필터의 정격이 소용량이고 부하에 가까이 설치되는 점을 고려할 때 제안하는 시스템은 가격과 성능에 있어 충분한 경쟁력이 있을 것으로 보인다.

제안하는 시스템에서는 고조파와 역률을 보상하기 위해 인버터가 공급해야 할 전류를 간접적인 방법으로 추정하여 공

급하는 것이다. 이를 위해 두 가지 원리가 사용되는데, 하나는 전원에서 공급되는 유효전력은 부하와 능동전력필터에서 소모되는 유효전력과 평형을 유지하는 것이며, 다른 하나는 고조파와 역률을 보상하기 위해 부하특성에 관계없이 전원전류의 위상을 강제로 전원전압의 위상에 추종시키는 것이다.

전자의 원리를 만족하지 못하면 능동전력필터의 직류단전압은 상승 또는 감소하는데 이를 일정하게 유지하도록 실제의 직류단전압을 감지하여 일정기준치를 추종하도록 제어경로를 고려한다. 이때 기준치와의 오차는 P-I 제어기를 통해 전원에서 공급해야 할 기준 전원전류를 설정하는데 사용된다. 즉 직류단전압이 일정기준치 이상이면 전원전류의 크기를 감소시키고 일정기준치 이하이면 전원전류의 크기를 증가시킨다. 이렇게 직류단전압을 일정하게 유지시켜야만 능동전력필터가 부하에서 요구되는 무효전력을 안정적으로 공급할 수 있다. 후자의 원리는 전원전류를 전원전압과 강제로 동상을 만들면서 요구되는 무효전력을 간접적으로 도출하여 이를 능동전력필터가 공급하도록 하는 것이다. 이 원리는 방정식 (5)의 값을 능동전력필터의 인버터가 생성하도록 하는 것과 동일한 의미이다.

4. 시뮬레이션 모형과 결과

제안하는 능동전력필터의 동작과 성능을 분석하기 위해 미보네빌전력과 전력연구원에서 개발하여 전세계적으로 전력회로 시뮬레이션에 보편적으로 사용되고 있는 EMTP를 이용하여 시뮬레이션을 실시하였다.^[6] 그림 3은 본 연구에서 고려한 EMTP시뮬레이션 모형을 나타낸 것으로 시뮬레이션에 사용된 정수들은 표 1에 나타내었다.

시뮬레이션은 다이오드정류기로 구성된 비선형부하를 전압이 110[V]인 단상전원에 연결하고 능동전력필터를 이와 병

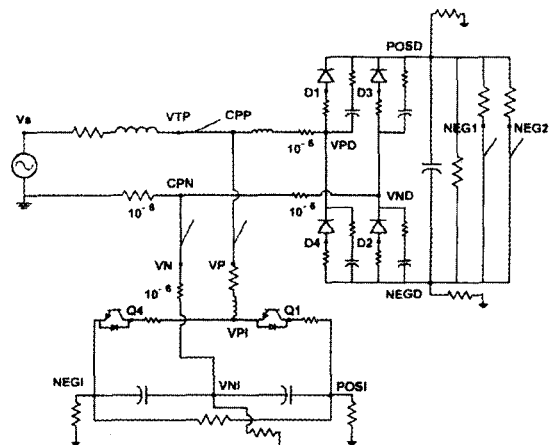


그림 3 EMTP 시뮬레이션 모형
Fig. 3 EMTP simulation model

표 1 시뮬레이션모형의 회로정수
Table 1 Circuit parameters of simulation model

파라미터	파라미터값
Source voltage	10[V], 60[Hz]
Load	C=6800[μ F], R=10.35[Ω]
DC link	C=1000[μ F] \times 2
Filter L	5[mH]
Switching frequency	8[KHz]
Source inductance	R=0.032[Ω], L=3.2[mH]
AC line connection inductance	R=0.05[Ω], L=5[mH]

표 2 시뮬레이션 제어기의 정수
Table 2 Parameters of simulation controller

파라미터	파라미터값
Vdc reference	420[V]
Kp	70
Ki	876
K1	1/120
K2	-25

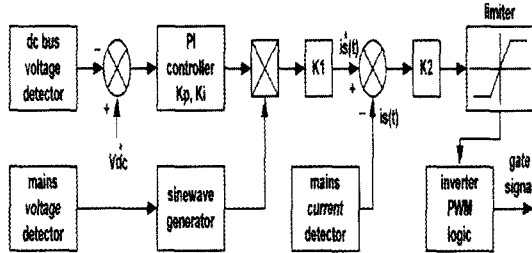


그림 4 EMTF 시뮬레이션 제어기
Fig. 4 EMTF simulation controller

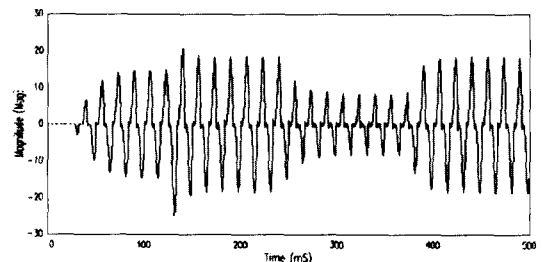
별로 연결하여 실시하였다. 정류기와 결합된 변압기와 선로를 모형화하기 위해 적절한 임피던스값으로 이를 표시하였다. 일정부하에서의 동작 뿐만 아니라 부하변동에서의 동작을 확인하기 위해 두 개의 스위치로 부하변동을 실시하였다.

그림 4는 시뮬레이션에서 사용된 제어기를 보여주며 이 제어기는 앞에서 설명한 능동전력필터의 제어기와 유사하게 구성하였다. 제어기의 전반적인 동작순서는 같으며 제어기 안에 포함된 세부적인 이득 값이나 기준치들은 표 2에 나타내었다.

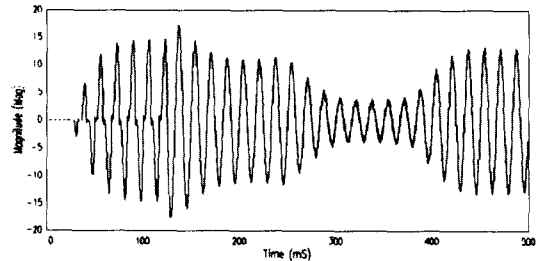
그림 5(a)~(d)은 본 논문에서 제안하는 단상능동전력필터의 동작을 시뮬레이션 한 결과를 각 부분 별로 파형을 나타낸 것이다. 120(ms) 지점에서 능동전력필터를 선로에 투입하는 것으로 가정하였다.

투입초기에는 정류기의 부하를 10(Ω)으로 한 후 270(ms) 지점에서 35(Ω)으로 변동하고 100(ms) 동안 지속한 후 다시 10(Ω)으로 복구하였다.

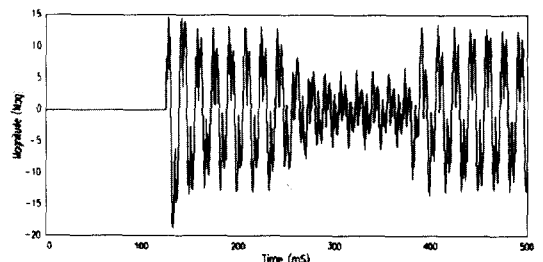
시뮬레이션 결과를 통해 제안하는 능동전력필터는 적절히 동작함을 확인할 수 있었다. 또한 고정부하에서 뿐만 아니라 부하변동 시에도 우수한 성능을 나타내는 것을 검증할 수 있었다. 특히 각각의 경우 직류단전압이 안정적으로 일정한 값을 유지함을 확인할 수 있었다.



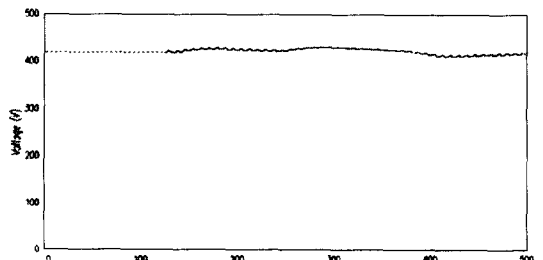
(a) 부하전류



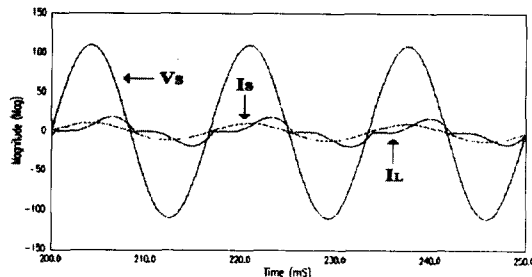
(b) 전원전류



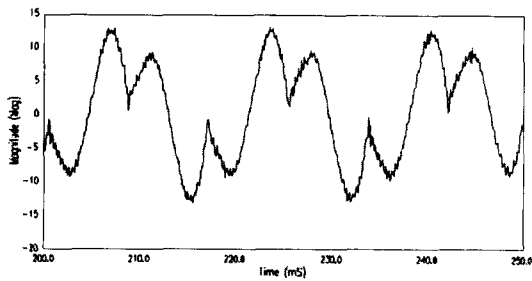
(c) 보상전류



(d) dc-link 전압



(e) 전원전압 V_s , 전원전류 I_s , 부하전류 I_L



(f) 보상전류

그림 5 시뮬레이션 결과
Fig. 5 Simulation results

그림 5(e), (f)은 정류기의 부하가 35(A)일 때 전원전압, 전원전류, 부하전류, 그리고 보상전류를 확대하여 나타낸 것이다. 능동전력필터에서 공급되는 보상전류가 부하에서 발생하는 고조파를 제거하여 전원전류에는 고조파성분이 제거된 정현파에 가까운 파형이 되고 전원전압과 동상이 됨을 확인할 수 있었다.

5. 프로토타입 제작 및 실험

제안하는 단상 능동전력필터의 하드웨어 구현을 통한 동작 검증을 위해 프로토타입을 제작하고 110V 전원에 다이오드 정류기와 같이 병렬로 연결하여 실험을 실시하였다. 인버터의 스위칭소자로는 600V/50A 듀얼 IGBT 하나를 사용하였으며, 인버터의 스위칭 주파수는 8KHz로 하였다.

제어기는 그림 6에서와 같이 OP앰프와 디지털 논리회로 등을 이용하여 아날로그 방식으로 제작하였다. 아날로그 제어기의 구성은 크게 정현파 발진부, 직류제어부, 전류제어부, 삼각파 발진부와 데드타임부로 나눌 수 있다. 정현파 발진부는 선로의 고조파 전류에 대해 인버터가 주입해야 할 보상 전류를 산출하기 위한 기준 정현파를 얻기 위해 구성하였다. 비선형부하에 대해 선로의 전압은 정현파로 나타나기 때문에 선로의 전압을 PT로 검출하여 이를 기준신호로 사용하였다.

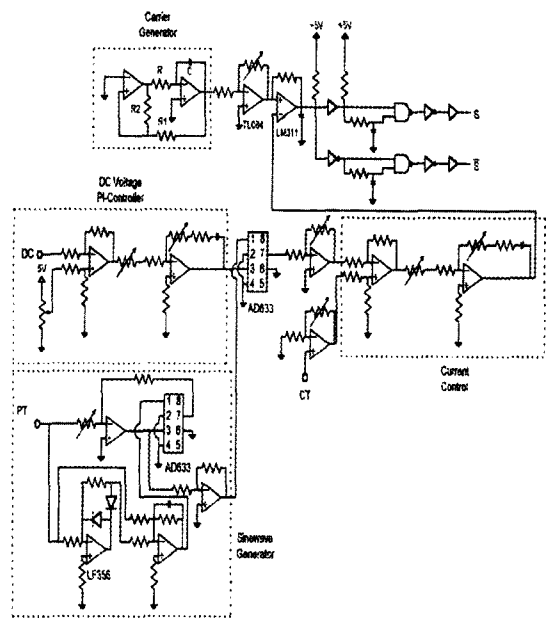


그림 6 아날로그 제어회로도
Fig. 6 Analog control circuit

이는 선로의 전압을 기준신호로 사용함으로써 인버터 주입 전류를 선로의 전압과 동상이 되게 주입하여 별도의 역률각 제어가 필요없이 역률을 향상시킬 수 있다는 장점 또한 가지고 있다. 이 정현파 발진부의 또 다른 특징은 선로의 전압이 변동할 경우 기준 정현파의 크기가 변하여 인버터의 오동작을 일으킬 수 있다는 점을 감안하여 선로의 전압변동이 발생하여도 항상 일정한 크기의 정현파를 발생한다는 점이다. 직류 전압제어부는 인버터가 선로에 대해 보상해야 할 무효성분의 양을 결정하기 위해 반드시 검출되어야 할 부분이다.

이를 위한 직류전압검출은 아날로그 디바이스에서 나오는 AD210AN을 사용하였고, OP앰프로 구성된 차동증폭기와 PI제어기를 사용하여 제어를 실시하였다. 전류제어부는 인버터가 선로의 고조파전류에 대해 보상해야 할 전류를 생성하기 위한 부분으로, 선로의 전류를 검출하여 이를 기준신호와 비교하여 이들의 차를 구함으로써 얻을 수 있다. 삼각파 발생부는 전류제어부를 통하여 얻은 전류신호를 스위칭 소자가 스위칭하는데 필요한 구형파의 PWM신호로 변환하기 위하여 사용하였다. 삼각파를 발생하기 위해 슈미트회로와 적분회로를 조합하여 이를 구성하였으며, 스위칭 주파수는 저항값을 적절히 조절함으로써 사용하고자 하는 주파수를 얻을 수 있는데, 이는 다음의 식으로 구할 수 있다.

$$f_0 = \frac{1}{4RC} \left(\frac{R_2}{R_1} \right) \quad (8)$$

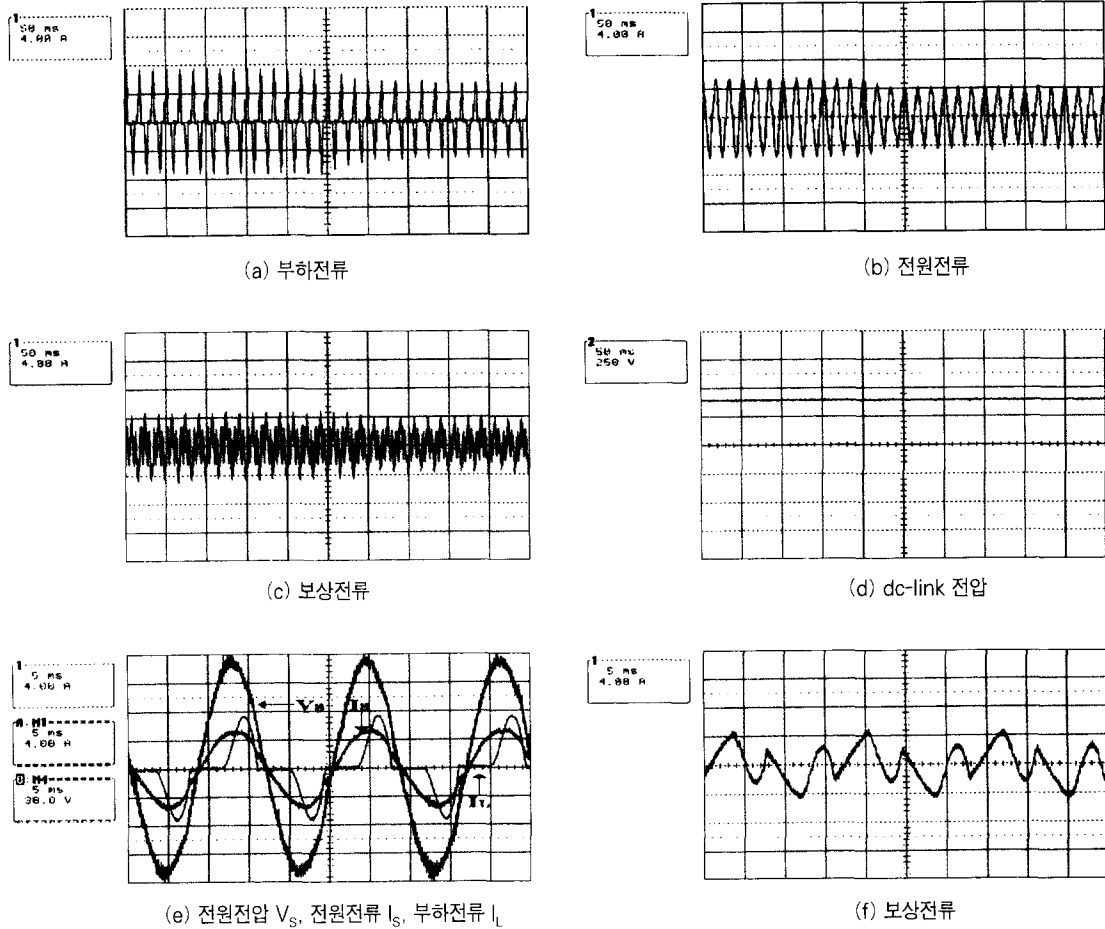


그림 7 실험결과 파형
Fig. 7 Experimental results

데드타임부는 인버터의 스위칭시 회로의 단락을 방지하기 위하여 전압형 인버터에서는 반드시 사용되어야 할 부분이다. 이를 위해 컴퍼레이터를 통해 생성된 구형파의 신호에 RC시정수를 두어 두 신호를 AND시킴으로 해서 데드타임을 주었다. 본 실험에서는 약 4μ(sec)의 데드타임을 두었다.

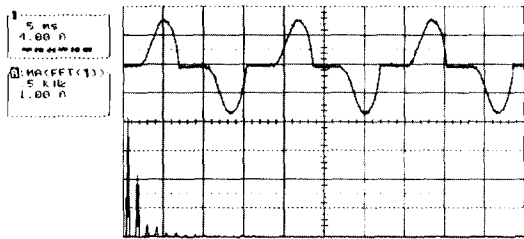
비선형부하로는 1kVA 용량의 단상전파 다이오드정류기에 RC 병렬부하를 연결하여 사용하였고, 일정부하시 뿐만 아니라 부하변동시의 성능을 확인하기 위해 10(Ω)과 35(Ω) 저항을 각각 스위치와 직렬로 연결하였다.

실험은 처음에는 부하저항을 10(Ω)으로 하여 능동전력필터를 투입하고 일정시간이 지난 후 부하저항을 35(Ω)로 변동시켰으며 약 300(ms) 후에 다시 부하저항을 10(Ω)으로 변동하였다. 그림 7은 실험결과를 나타낸 것인데 시뮬레이션에서처럼 부하변동구간을 동시에 전부 나타낼 수가 없어서 부하저항이 10(Ω)→35(Ω)로 변동하는 구간 근방만 나타내

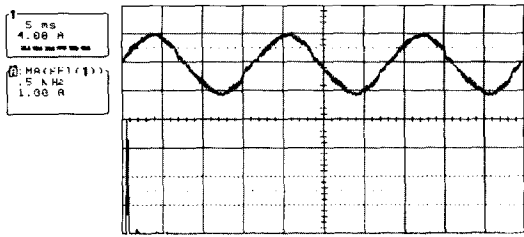
었다. 부하가 일정하게 있다가 갑자기 변동을 한 후에도 전원전류는 정현파에 가깝게 유지됨을 확인 할 수 있다. 보상전류 또한 부하 변동시 그 크기가 보상되는 양만큼 변화함을 볼 수 있으며, 능동전력필터의 직류링크전압은 부하변동과 관계없이 일정하게 유지됨을 확인 할 수 있다.

그림 7의 (e)는 전원전압, 전원전류, 부하전류를 확대하여 나타낸 그림이다. 시뮬레이션에서와 같이 전원전류가 고조파성분을 제거하고 정현파의 형태로 보상됨을 볼 수 있으며, 전원전압과 동상의 형태로 무효성분까지 보상됨을 알 수 있다. 그림 7의 (f)는 이때의 보상전류 파형을 나타낸 것이다. 이상의 결과는 앞의 시뮬레이션 결과와 거의 일치함을 알 수 있다.

그림 8의 (a)와 (b)는 부하전류와 전원전류의 고조파성분을 스펙트럼으로 분석하여 나타낸 것이다. 보상 후 전원전류의 고조파는 대폭 제거됨을 확인 할 수 있다.



(a) 부하전류 스펙트럼 분석



(b) 전원전류 스펙트럼 분석

그림 8 스펙트럼 분석
Fig. 8 Spectrum analysis

6. 결 론

본 논문에서는 가격이 저렴한 단상능동전력필터를 제안하고 그 동작과 성능을 시뮬레이션으로 확인하였다. 또한 하드웨어 프로토타입을 제작하고 실험을 수행하여 그 결과를 시뮬레이션 결과와 상호 비교 분석하였다. 통상의 능동필터와는 달리 전원전압, 직류단 전압, 그리고 전원전류를 검출하기 위해 두 개의 전압센서와 하나의 전류센서를 사용하고 능동전력필터의 인버터로는 단상반브릿지를 사용한다. 따라서 제안하는 시스템은 저가이며 구성이 간단하고 부하측에서 입력을 필요로 하지 않아 프로그래밍 타입으로 제작 가능한 장점을 갖는다.

본 논문은 명지대학교 우수정보통신대학원 98년도 연구비 지원으로 수행된 과제임.

참고 문헌

- [1] H. Akagi, Y. Kanazawa and A. Nabae, "Generalized Theory of the Instantaneous Reactive Power in Three-Phase Circuits", Int. Conf. Power Electronics, Tokyo, 1983, pp.1375~1386.
- [2] Yu Qin, Shanshan Du, "A DSP Based Active Power Filter for Line Interactive UPS", IEEE IECON, pp.884~888, 1995..
- [3] L. Malesani, L. Rossetto, and P. Tenti, "Active

Filter for Reactive Power and Harmonics Compensation", IEEE Power Electron. Spec. Conf. Rec., pp.321~330, 1986.

- [4] F. Harashima, H. Inaba, and K. Tsubio, "A Closed-loop Control System for the Reduction of Reactive Power required by Electronic Converters", IEEE Trans., IECI-23, (2), pp.162~166, 1976.
- [5] M. Brenen, et. al., "Single-phase Active Power Filter with One Current Sensor in Source Side", Research Memo 89-PE-03-0011, Science & Technology Center, Westinghouse Electric Corp., August 1989.
- [6] H. Jou, J. Wu, and H. Chu, "New Single-phase Active Power Filter", IEE Proceeding Electric Power Application, vol. 141, no. 3, pp.129~134, May 1994.
- [7] 한병문, 김희중, 박덕희, 소용철, "단상 능동전력필터의 새로운 제어방식", 대한전기학회 추계학술대회 논문집, pp.128~130, 1998.

〈 저 자 소 개 〉



김희중(金羲重)

1970년 9월 10일생. 1997년 2월 명지대 전기공학과 졸업. 1999년 2월 동 대학원 전기공학과 졸업(석사). 현재 동 대학원 전기공학과 박사과정.



한병문(韓炳文)

1953년 7월 5일생. 1976년 2월 서울대 전기공학과 졸업. 1988년 12월과 1992년 5월 미국 아리조나 주립 대학원 전기공학과 졸업(석사 및 박사). 미국 Westinghouse 중앙연구소 전력전자 연구실 선임연구원. 현재 명지대 전기정보제어공학부 부교수. 당 학회 총무이사.



박용식(朴溶植)

1958년 5월 30일생. 1981년 2월 한양대 전기공학과 졸업. 1983년 2월과 1988년 8월 서울대 대학원 전기공학과 졸업(석사 및 박사). 현재 명지대 전기정보제어공학부 부교수.