

병렬형 전압원 능동필터의 성능개선

장유리* 김원호** 임근희**
 * 러시아 전기물리설비연구소 ** 한국전기연구소

Performance improvement of a voltage source active filter

Yuri Kang* Wonho Kim** Geunhie Rim**
 * Russia Institute of Electrophysical Apparatus ** KERI

Abstract - Various nonlinear loads such as diode rectifiers, and phase controlled converters connected to ac source cause harmonic pollutions in ac mains. Recently some filters have been proposed to minimize the potential problems.

This study describes a method to improve the performances of a voltage source active filter. Two feedback loops are used in the scheme ; one for reactive power compensation and the other for harmonic eliminations.

1. 서론

능동필터를 개발하는데 있어 현재까지 검토된 방식으로 대표적인 것은 부하에 병렬로 접속하여 고조파 전류를 계통내에 주입하여 고조파 전류를 상쇄하는 방식과 계통내에 직렬로 접속하여 고조파 전압을 상쇄하는 방식이다.

본 연구에서는 병렬형 전압원형 간접전류제어 방식이 제시되는데 제어방식이 교적 간단하고 저장 capacitor 전압제어기기가 전원전류를 제어하는데 핵심적인 역할을 한다. 또한, 병렬형 전압원 능동필터에 2개의 feedback loop를 사용하여 main loop는 무효전력 보상 역할을 하며 inner loop는 고조파전류보상 역할을 하는 간접 제어 방식을 채택하였다. 이렇게 함으로서 기존 방식과 비교하여 제어방식이 간단하며 부하가 변동하는 과도상태에 있어서도 빠른 응답을 얻을 수 있으며 제안된 전력회로의 transient sliding-mode control은 전원 전압의 위상에 관계 없이 보상전류를 4 quadrant에서 조절할 수 있다. 설계된 전압제어기는 빠른 응답 특성을 가졌으나 전원전류파형에는 영향을 미치지 않아 저장장치로 사용되어지는 커패시터의 값을 최소화할 수 있으며 다양한 부하와 관련된 강인성 문제는 부하성분에 따라서 통합시켜 그 전류를 sensing 및 correcting한 후 adding 방식을 통하여 해결하였다.

2. 병렬형 전압원 능동필터

병렬형 전압원형 간접전류제어 방식은 제어방식이 비교적 간단하고 저장 capacitor 전압제어기기가 전원전류를 제어하는데 핵심적인 역할을 수행한다.

전체 시스템은 그림 1.과 같이 제어부와 전력회로로 나뉘어지며 그림 2.는 전력회로의 이상적인 동작파형을 보여주는 그림이다. 만일, 부하 전류 i_L 이 그림 2.에서와 같이 구형파의 형태를 지니고 있다면 이는 정현파의 기본파 성분과 이 성분을 제외한 나머지 고조파 성분의 합으로 구성된다. 푸리에 급수로 i_L 을 표시하면

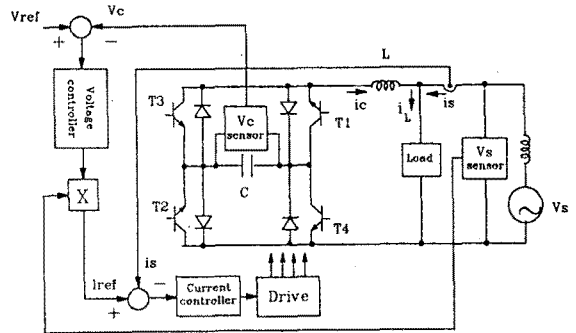


그림 1. 병렬형 전압원 능동필터의 구성

$$i_L(\omega t) = a_1 \sin \omega t + b_1 \cos \omega t + \sum_{n=2}^{\infty} (a_n \sin n\omega t + b_n \cos n\omega t) \quad (1)$$

단, $a_1 \sin \omega t$ - 부하의 유효전류 성분

$b_1 \cos \omega t$ - 부하의 무효전류 성분

$\sum_{n=2}^{\infty} a_n \sin n\omega t + b_n \cos n\omega t$ - 부하전류의 고조파 성분

따라서, 능동필터의 보상전류 i_C 를 그림 2.에서와 같이 고조파 성분과 무효전류성분으로 일치하게 제어하면 전원전류 i_S 에는 기본파 유효전류 성분만이 남게된다. 즉, 능동형 전력필터는 부하의 무효 및 고조파 전류 i_C 를 전원대신 부담하는 역할을 수행한다. 보상전류 i_C 는 본 계통에서는 4상한에서 조절되어야 한다. 저장 capacitor의 전압이 $V_C > |E_S|$ 상태에서 L_C 의 전압은 switching mode에 따라서 표 1.과 같다.

ωt	V_S	T1	T2	T3	T4	V_L	di_z/dt	mode number
0- π	$V_S > 0$	off	off	on	on	$V_S + V_C$	> 0	1
		off	off	on	off	V_S	> 0	2
		on	on	off	off	$V_S - V_C$	< 0	3
$\pi-2\pi$	$V_S < 0$	off	off	on	on	$V_S + V_C$	> 0	4
		on	off	off	off	V_S	< 0	5
		on	on	off	off	$V_S - V_C$	< 0	6

표 1. 저장 capacitor의 전압에 따른 L_C 의 전압

그러므로, ωt 의 변화에 따라서 di_L/dt 값도 큰 영역에서 변하고 있다. $0 < \omega t \leq \pi$ 영역에서 $V_L > 0$ 일 때에는 그림 3.과 같이 두 가지 함수로 변하는데

$$V_L(\omega t) = V_{sm} \sin \omega t \quad (\text{mode2})$$

$$V_L(\omega t) = V_C + V_{sm} \sin \omega t \quad (\text{mode1})$$

으로 변하게 된다.

$V_L < 0$ 일 때는 $V_L(\omega t) = -V_C + V_{sm} \sin \omega t$ (mode3)이다. 이 영역에서 di_L/dt 값을 분석해 보면 mode2 상태에서는 $\phi=0$ 와 $\phi=\pi$ 영역에서 di_L/dt 값이 적으며 보상전류 조정이 제한되었다. $\phi=\pi/2$ 영역에서는 $di_L/dt > 0$ 값이 크기 때문에 계통의 강인성 문제가 발생할 가능성이 있다. 마찬가지로, $\pi < \omega t \leq 2\pi$ 상태에서도 이 문제가 중요한 요인이 된다.

보상전류 i_L 의 제어 문제와 계통의 강인성 문제 등을 항상시키려면 mode1 - mode6을 사용하여 ωt 에 따라 가변 switching mode(sliding mode)로 동작을 시킴으로써 특성을 양호히 할 수 있다.

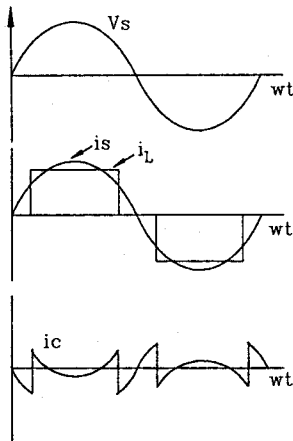


그림 2. 병렬형 능동필터의 이상적인 동작파형

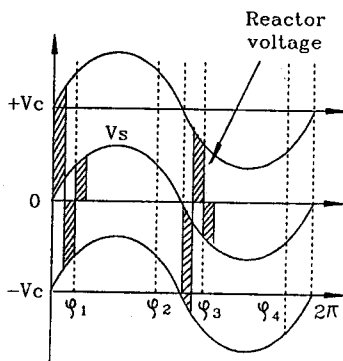


그림 3. Switching mode에 따른 리액터 전압

3. 제어부의 설계

3.1 직접제어방식

현재 제어부 설계 방식은 두 개념으로 나누어지고 있다. 첫째는 직접제어방식으로서 부하 전류로부터 기본파성분과 고조파 성분을 분리, 능동필터가 계통에 주입하여야 할 전류를 계산해내는 기능을 가지고 있어 보상전류를 검출해 내며 검출된 전류의 파형과 inverter의 전류제어를 통하여 전류제어의 지시에 따라 필요한 전류를 만들어 낸다.

이 방식은 제거하고자 하는 특정 차수의 고조파 성분들을 대역통과 필터를 사용하여 검출한 다음, 이를 합산하여 보상전류의 기준으로 삼는 방식과 고주 푸리에 변환을 통해 부하전류에 함유되어 있는 고조파 성분의 크기를 검출한 다음 이의 역변환을 통해 보상전류를 계산하는 방식이다.

3.2 간접제어방식

무효전력과 고조파전류 보상방식은 간접 방식이다.

본 제어방식은 2개의 feedback loop를 사용하는 제어방식으로서 main loop는 무효전력 보상 역할을 하고 inner loop는 고조파 전류보상 역할을 한다.

본 방식의 물리적 개념은 저장 capacitor의 동작을 분석하면 쉽게 이해할 수 있다. Carrier 주파수가 60Hz일때, steady state 상태에서 보상장치로 흐르는 전류 i_c 는 $i_c(t) = i_c(t+T)$ 를 만족한다. 그러므로 C_S 전압은

$$V_C(t) = \frac{1}{C_C} \int i_c(t) dt$$

이며, 주기간의 $V_C(t)$ 변화율

$$\Delta V_C(t+T) = \frac{1}{C_C} \int_t^{t+T} i_c(t) dt$$

라고 할 때에 이 식들을 분석하면

- 1) $\Delta V_C(t+T) > 0$: 전원측에서 공급하는 전류가 무효전력 보상에 필요한 전류보다 더 많다.
- 2) $\Delta V_C(t+T) < 0$: 전원측에서 공급하는 전류가 무효전력 보상에 필요한 전류보다는 적으며 부족한 전력은 저장 capacitor에서 부하쪽으로 공급된다.
- 3) $\Delta V_C(t+T) = 0$: 보상장치로 흐르는 유효전류는 존재 않는다.

본 능동전력 필터장치의 제어에 대해 설명하면 다음과 같다.

Inner 전류 loop의 제어 입력 i_{nr} 파형은 전원측 기본파 파형이고 feedback 신호는 보상전류 i_c 를 sensing하여 발생한다. 그러므로, 보상장치의 보상전류 i_c 는 무조건 i_s 파형을 $A \sin \omega t$ 파형으로 조절하며 고조파 전류 filtering을 수행한다. Main 전압 loop는 storage capacitor 전압 V_C 로부터 sensor에 의해 측정되고 기준전압 V_{nr} 전압과 비교하여 무효전력 compensator와의 곱하기를 통해 inner loop의 command신호를 발생한다. 그러므로, I_{nr} 값이 요구되는 수준에 맞으면 storage condensator의 전압은

$$V_S(t+nT) = \text{const} \quad (T : \text{전원전압의 주기})$$

가 된다.

이것은 보상장치로 흐르는 전류가 전원측 전력 및 보상장치의 전력과 교환되고 있다는 것을 보여준다. $V_S(t+nT) \neq 0$ 이라면 저장 장치에서 부하쪽으로 전력공급이 발생되고 아니면 전원측에서 보상장치 쪽으로 전력이 공급되고 있음을 알 수 있다.

종래에 사용되는 전압 제어기의 특성을 그대로 취한다면 다음과 같은 문제점을 야기할 수 있다.

첫째, 보상장치의 전력회로로 사용되는 전압형 컨버터의 구조적인 문제로 직류측 전압에 고조파가 발생하고 이에 기인하여 capacitor에 축적된 에너지를 교류측에 변환하는 과정에서 전원전류 파형에 3의 배수를 제외한 홀수차 고조파가 파생된다.

둘째, 과도상태에서 보상장치가 순시적인 유효전력 보상장치로 작용하게 되는데, 전압제어기의 설계 결과에 따라 부하변동시에 직류측 전압변동이 과도하게 일어날 수 있다. 그러나, 보상장치의 직류측 전압은 전류제어형 PWM컨버터의 특성상 정상적인 전류제어가 가능할 수 있도록 직류전압 크기의 하한치가 주어지며, 전력용 반도체 소자의 전압정격에 의하여 상한치가 주어진다. 따라서, 직류측 전압변동의 폭이 상·하한치를 벗어나게 되면 보상특성에 영향을 미친다. 이 두가지 문제점은 저장장치의 값을 키우며 해결할 수 있지만 과도상태에는 최선의 해결이라고는 볼 수 없다.

제어방식으로서 첫째 문제점은 전압 controller로서 직렬로 연결된 Sample & Hold 소자를 사용하여 해결할 수 있다. Sampling시기는 전원전압과 zero crossing시킨다. 그러므로, 보상전류는 직류측 고조파 변화에 전혀 영향을 미치지 않는다. 두번째 문제점은 응답이 빠른 제어기를 사용하여 해결할 수 있다. 본 시스템은 PI controller와 두개의 Sample & Hold 소자 및 inverter를 사용한 전압 오차의 differential 성분을 구하는 channel을 이용하였다. 그러므로, PI channel은 천천히 변하는 무효전력보상 역할을 하고 빠른 부하변동으로 발생하는 storage capacitor의 전압 변화를 감소한다. 이 경우에 저장 capacitor의 값은 steady state상태에서 이루어지는 ripple 전류값에서만 계산된다면 C_S 의 최소화 문제가 해결된다고 할 수 있다. 또한, transient condition에서 전원측에서 공급하는 무효전력도 최소화한다.

능동필터의 중요한 문제점은 다양한 부하의 변화에 따른 강인성에 관련된 문제이다. 특히, capacitor 성분이 큰 부하는 공진을 발생하므로 제어 계통의 correction 문제가 쉽게 해결되지 않는다. 그러나, 다양한 부하가 병렬로 연결되고 있기 때문에 한 성분을 가진 부하들을 통합시켜 그의 전류를 sensing 및 correcting한 다음 adding하면 강인성 문제가 쉽게 해결할 수 있다.

능동필터 전력회로의 효율 증가는 sliding-mode로 해결할 수 있다. 예를 들면, slide mode는 표 1.에 있는 6가지 mode에서 4가지 mode를 사용하고 있다. 따라서, 위상변화에 의해 $wt = n\pi/2$ 영역에서 전류조절 가능성이 좋지 않고 오차가 크다.

본 논문에서 제안된 계통에서는 기존의 sliding-mode를 개선하였다. 전원전압값이 적은 경우에 있어서는 coupling inductance에 $V_C + V_S \sin wt$ 와 $-V_C - V_S \sin wt$ 가 인가되는 mode를 사용하고 전원 전압이 큰 경우에는 $V_S \sin wt$ 와 $\pm V_C + \sin wt$ mode를 사용한다. 본 sliding mode는 두 개의 comparator와 logic소자를 사용하여 실용화 되었다.

표 2. 개선된 sliding-mode

wt	사용하는 mode (표1)
$0 < wt \leq \phi_1$	1, 3
$\phi_1 < wt \leq \phi_2$	2, 3
$\phi_2 < wt \leq \pi$	1, 3
$\pi < wt \leq \phi_3$	4, 6
$\phi_3 < wt \leq \phi_4$	4, 5
$\phi_4 < wt \leq 2\pi$	4, 6

그러므로, $|di/dt|$ 값 변화의 차수를 감소하여 보상전류 i_C 의 조절문제와 계통의 강인성을 증가한다.

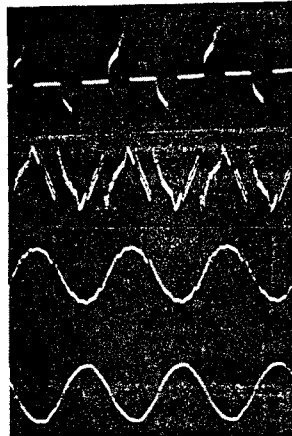


그림 4. 부하전류

그림 5. 보상전류

그림 6. 전원전류

그림 7. 전원전압

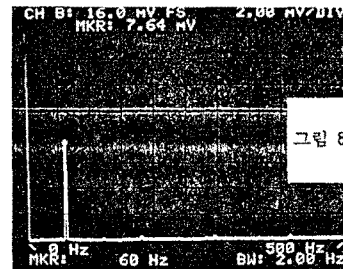


그림 8. 입력전류의 harmonic spectrum 분석도

4. 실험결과

그림 4, 5, 6, 7은 각각 부하전류, 보상전류, 전원전류, 전원전압을 나타내는 그림이며 그림 8, 은 전원 전류를 고조파 분석한 harmonic spectrum이다. 실험결과에서 보는 바와 같이 부하전류와 보상전류의 합에 의해 전원전류가 정현파가 되며 거의 기본파 성분만을 포함한다.

5. 결론

보상기준전류 발생을 위한 간접방식은 기존 방식과 비교하면 제어방식이 비교적 간단하고 부하변동하는 과도상태에서도 빠른 응답특성을 가지고 있다. 그러므로, 제어기 설계를 hardware로 하는 필요성이 크다.

제안된 전력회로의 transistor sliding-mode control은 전원전압의 위상에 관계없이 보상전류를 4 quadrant에서 조절한다. 또한, 설계된 전압제어기는 빠른 응답특성을 가졌으나 전원 전류파형에는 영향을 미치지 않는다. 그러므로, 저장장치로 사용되고 있는 capacitor 값을 최소화할 수 있다.

다양한 부하등과 관련된 강인성 문제는 부하성분에 따라서 부하등을 통합시켜 그의 전류를 sensing 및 correcting한 다음 adding 방식으로 해결한다.

참고문헌

1. T. Kawabata et al., "Parallel Processing Inverter System", IEEE Trans. Power Electron., vol. 6, no. 3, pp442-450, July, 1991.
2. David A. Torrey and Adel M. A. M. Al-Zamel, "A Single-Phase Active Power Filter for Multiple Nonlinear Loads", IEEE APEC., pp901-908, 1994.