직렬형과 병렬형 능동필터를 조합한 통합형 전력품질 개선장치에 관한 연구

이 현 옥 · 노 대 석 · 오 성 철
한국기술교육대학교

The Study on Unified Power Quality Conditioner(UPQC) Aiming at the Integration of Series-active and Shunt-Active Filter

Hyun-Ok Lee · Dae-Seok Rho · Sung-Chul Oh
Korea University of Technology and Education

Abstract - This paper deals with single-phase unified power quality conditioner(UPQC), which aims at the integration of series-active and shunt-active filter. The series filter is used to compensate for the voltage distortions and the shunt filter is used to provide reactive power and counteract the harmonic current injected by the load. Also, the voltage of the DC link capacitor is controlled to a desired value by the shunt active filter. The performance of UPQC under load nonlinearities conditions is investigated using simulation as well as experimental results.

1. 서 론

최근 반도체 전력변환장치가 광범위하게 이용되면서 이들 기기에서 발생되는 고조파가 심각한 전력품질 저하를 일으키고 있다. 이들 고조파는 통신선의 유도장애를 유발하며, 지중 송전선의 송전용량을 저하시킨다. 또한 컴퓨터, 계측장비등의 각종 전자장비의 오동작, 보호 계전기의 오동작 및 계기류의 오차증가를 야기시킨다. 따라서 고조파 발생에 대한 효과적인 대책이 필요하게 되었다.

고조파 장해를 감소시키기 위하여 과거에는 수동필터를 주로 사용하였으나, 직렬 및 병렬공진에 의해서 필터 자체나 인근에 설치된 진상용 커패시터가 소손되는 등의 사고가 빈번히 일어나고 있다. 공진을 억제하기 위해서는 필터의 감쇄율을 증가시키는 방법을 생각할수 있으나 이는 필터의 고조파 흡수능력을 저하시키며 불필요한 손실을 발생하는 문제를 지니고 있다[1].

위와 같은 수동필터의 단점을 극복하기 위한 방안으로 능동필터를 이용한 고조파 제거 방식이 있다. 이 방식은 고조파 발생원에서 유출되는 고조파 전류에 상반되는 전류를 전력변환장치를 이용해 주입하여 전원측으로 유출되는 고조파 전류를 제거하는 적극적인 방식이다. 이 방식은 수동필터의 단점을 극복하였으나 비용 문제와 제어의 복잡성 때문에 상업적으로 이용되는데 문제점을 가지고 있었다[2]. 그러나 전력용 반도체 소자의 가격 저하와 제어성능의 향상으로 인하여 실용성을 가지게 되었다.

능동필터의 종류에는 하이브리드형, 직렬형과 병렬형이 있다. 하이브리드형은 능동필터와 수동필터를 조합하여 사용함으로써 비용상 절감과 능동필터의 용량을 저감시킬 수 있다. 직렬형 능동필터는 전원측의 고조파전압을 검출하여 선로상에 해당 고조파전압을 직렬로 삽입, 상쇄함으로써 부하측에는 고조파전압이 나타나지 않도록 하는 역할을 한다. 실제 적용상에는 DC단 커패시터를 가지는 다이오드 정류기 같이 고조파 전압원으로 동작하는 부하에 직렬로 삽입되어 고조파전류에 대해서만 선택적으로 높은 임피던스로 작용하게끔 제어된다. 반면에 병렬형 능동필터는 부하에 흐르는 고조파전류성분을 검출, 그에 해당하는 전류를 계통에 주입함으로써 전원측에는 기본파 전류만을 흐르도록 한다. 이 능동필터는 주로 DC단 인덕터를 가지는 싸이리스터 정류기 같은 고조파 전류원으로 동작하는 부하에 적용된다.

따라서, 본 논문에서는 병렬형 능동필터와 직렬형 능동필터를 조합한 통합형 전력품질 개선장치(UPQC)를 제안한다. 병렬형 능동필터는 전원측 전류를 전원측 전압과 동상인 기본파 성분을 가지는 기준 전류에 강제로 추종시켜, 무효전력의 보상 및 고조파 전류를 제거하도록 하였으며, 두 능동 필터 사이의 DC link 전압을 일정하게 유지하도록 실제의 DC link 전압을 감지하여 일정 기준치를 추종하도록 제어 경로를 고려하였다[3]. 또한, 직렬형 능동필터는 부하측 전압을 전원측 전압에서 산출한 기준전압에 추종시켜, 고조파 전압제거와 순시전압강하 보상의 기능을 수행하도록 하였다[4]. 제안된 통합형 전력품질 개선장치의 성능을 확인하기 위하여, MATLAB/SIMULINK 프로그램을 이용하여 시뮬레이션과 TMS320C32를 이용한 실험을 수행하였다.

2. 제어 원리

2.1 능동필터의 제어 원리

그림 1은 본 논문에서 제안한 통합형 전력품질 개선장치의 시스템 구성도을 나타낸 것이다. 두 능동필터는 단상 전파브리지의 전압원 인버터(VSI)로 구성되었고, 두 능동필터 사이에 DC link 커패시터가 연결되었다. 부하는 고조파 발생의 원인이 되는 비선형 부하로 구성하였다.

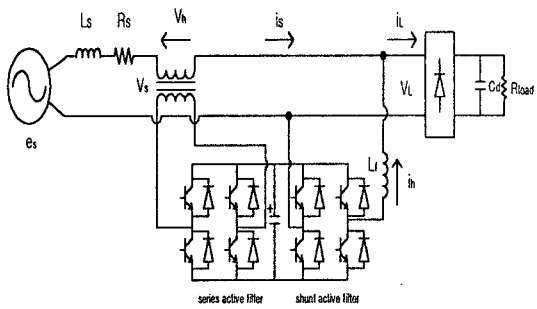


그림 1 통합형 전력품질 개선장치의 구성도

그림 1에서 전원측 전압이 순수 정현파 신호라 가정하면 다음 식과 같이 나타낼 수 있다.

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

여기서, V_{sm} : $v_s(t)$ 전압의 최대값

비선형 부하로 인해 전원측 전류는 기본파 성분과 고조파 성분의 합으로 이루어진 전류가 흐르게 되므로 다음 식과 같이 표현된다.

$$i_s(t) = \sum_{n=1}^{\infty} I_n \sin(n\omega t + \theta_n)$$
$$= I_1 \sin(\omega t + \theta_1) + \sum_{n=2}^{\infty} I_n \sin(n\omega t + \theta_n) \quad (2)$$

식 (1)의 $v_s(t)$ 전압과 동위상인 기준 정현파 신호를 다음 식과 같이 가정 할 수 있다.

$$i_r(t) = \sin(\omega t) \quad (3)$$

따라서 전원측 전류의 기본파 성분의 실수부 크기는 Fourier 알고리즘을 이용하여 다음 식과 같이 구할 수 있다.

$$I_x = \frac{1}{T}\int_0^T i_s(t) i_r(t)\, dt$$
$$= \frac{1}{2} I_1 \cos\theta_1 \quad (4)$$

그리고 전원측 전류의 기본파 성분의 실수부는 $2I_x$와 $i_r(t)$을 곱하여 구할 수 있으며 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$i_{sf}(t) = 2I_x\, i_r(t)$$
$$= I_1 \cos\theta_1 \sin(\omega t) \quad (5)$$

이때, 병렬형 능동필터가 보상해야할 전류는 다음 식과 같다.

$$i_h(t) = i_s(t) - i_{sf}(t)$$
$$= \sum_{n=1}^{\infty} I_n \sin(n\omega t + \theta_n) - I_1 \cos\theta_1 \sin(\omega t) \quad (6)$$

본 논문에서는 병렬형 능동필터가 전원측 전류의 기본파 성분의 실수부 $i_{sf}(t)$를 추종하도록 하여 무효전력 보상과 고조파 전류를 제거하도록 하였다.

또한 직렬형 능동필터는 부하측 전압을 전원측 전압에서 산출한 기준전압에 추종시켜 전원측 전압의 순간적인 변동에 대한 보상과 고조파전압을 제거하도록 하였으며, 보상 전압 $v_h(t)$는 부하측 기준 전압 $v_L^*(t)$와 검출된 부하측 전압 $v_L(t)$와의 차로 구해진다.

$$v_h(t) = v_L^*(t) - v_L(t) \quad (7)$$

2.2 DC link 전압제어

능동필터는 자체 소모하는 전력이 영인 것이 이상적이지만, 실제의 경우는 스위칭 소자 및 커패시터 누설전류에 의한 손실이 있으므로 약간의 유효전력이 전원으로부터 공급되어져야 한다. 만일 유효전력이 전원에서 공급되지 않으면 DC link 전압은 감소하여 고조파 보상이 불가능해진다. 이 문제는 전원전류의 크기를 조절함으로써 해결할 수 있다.

그러므로 식 (5)은 DC link 전압을 일정하게 유지할 수 있도록 DC link 전압을 감지하여 일정 기준치를 병렬형 능동필터가 추종하도록 전원측 기준전류를 다음과 같이 수정해야 한다.

$$i_s^*(t) = (I_1 \cos\theta_1 + I_{cor}) \sin(\omega t) \quad (8)$$

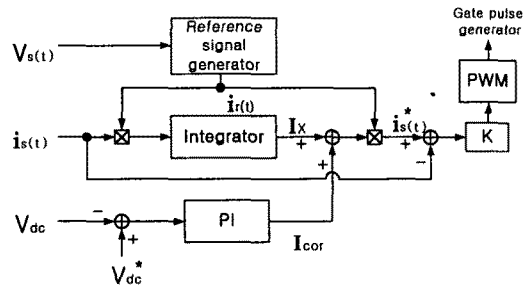
여기서, I_{cor} : DC link 전압변동에 대한 보상전류

3. 제어 알고리즘

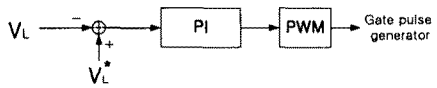
그림 2는 본 논문에서 제안된 제어 시스템의 블록선도를 나타낸 것이다.

그림 2(a)는 병렬 능동필터의 제어회로로서, 검출된 직류측 전압은 미리 설정된 전압과 비교되며, 그 결과는 PI제어기로 보내진다. PI제어기의 출력 I_{cor}은 전원측 전류의 기본파 성분의 실수부 크기 I_x와 더해지고, 기준 정현파 신호 $i_r(t)$가 곱해져, 전원측 기준전류 $i_s^*(t)$를 발생시킨다. 이 전원측 기준전류는 실제 전원측 전류와 비교되며, 오차는 증폭기로 증폭되어 PWM 변조기로 보내어져, 인버터의 게이트 펄스를 발생시킨다. 또한, 전원측 전압은 기준 정현파 신호를 발생시키는데 이용된다.

한편, 그림 2(b)는 직렬형 능동필터의 제어회로로서, 전원측 전압에서 산출한 기준전압 $v_L^*(t)$는 실제 부하측 전압 $v_L(t)$와 비교되며, 오차는 PI제어를 통하여 PWM 변조기로 보내어져 인버터의 게이트 펄스를 발생시킨다.



(a) 병렬형 능동필터의 제어회로



(b) 직렬형 능동필터의 제어회로

그림 2 시스템 제어 블록 다이어그램

4. 시뮬레이션

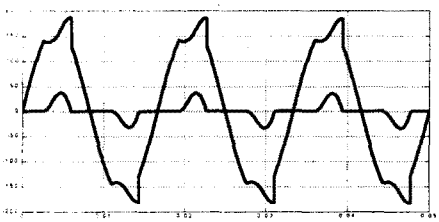
표 1에 주어진 시스템 파라미터에 따라 시뮬레이션을 수행하였다.

표 1 시스템 파라미터

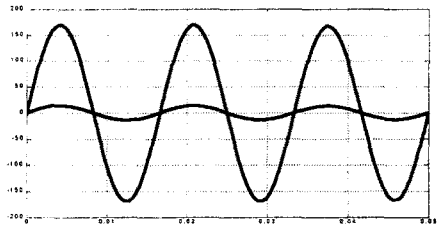
Parameters	Value
입력전압 (e_s)	120 V, 60 Hz
전원측 임피던스(R_s, L_s)	1 mΩ, 1 mH
부하 임피던스(C_d, R_{load})	1000 μF, 20 Ω
직렬 변압기의 누설 인덕터스와 저항(L_{st}, R_{st})	4 mH 0.5 Ω
필터 인덕턴스 (L_f)	5 mH
DC link 커패시터(C_{dc})	2000 μF
DC link 전압(V_{dc})	240 V

그림 3(a)는 보상 전 부하측 전압과 전원측 전류 파형으로 많은 고조파가 포함되어 있음을 알 수 있다. 그

림 3(b)는 보상 후 부하측 전압과 전원측 전류 파형으로 전류 파형이 정현파에 가깝고 위상이 전압과 일치함을 알 수 있다. 이것은 고조파 제거뿐만 아니라 무효 전력까지 보상되었음을 보여준다.



(a) 보상 전 부하측 전압과 전류



(b) 보상 후 부하측 전압과 전류

그림 3 시뮬레이션 결과

5. 실험 및 결과 고찰

그림 4는 통합형 전력품질 개선장치의 성능을 확인하기 위한 실제 회로 구성도이다. 이 실험에서는 병렬형 능동필터대신 정류기로 구성하여 DC link전압을 일정하게 유지하도록 하였고, 직렬형 능동필터는 고조파 전류 $i_h(t)$와 고조파 전압 $v_h(t)$를 보상하도록 하였다.

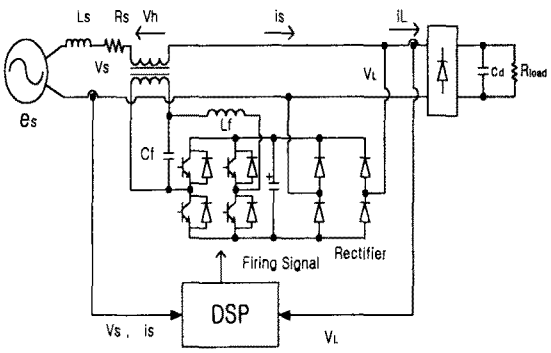
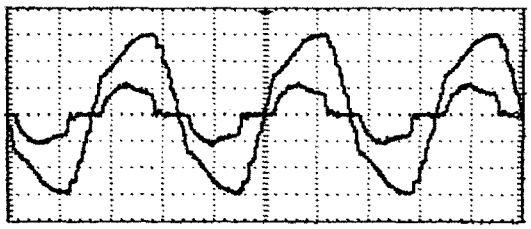
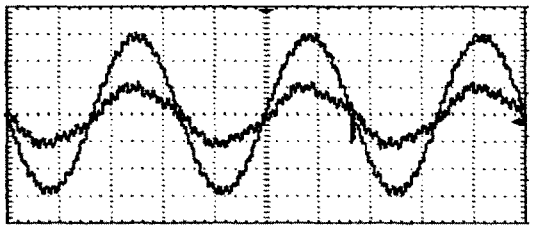


그림 4 실험 회로 구성도

그림 5는 보상전·후의 부하측 전압과 전원측 전류의 실험 파형으로 고조파가 많이 제거되었으나 전압과 전류의 위상차가 있음을 알 수 있다.



(a) 보상전 부하측 전압(50V/div)과
전원측 전류(20A/div,5ms/div)



(b) 보상후 부하측 전압(50V/div)과
전원측 전류(10A/div,5ms/div)

그림 5 보상 전·후의 실험 파형

6. 결 론

본 논문에서는 직렬형 능동필터와 병렬형 능동필터를 조합하여 고조파와 무효전력을 동시에 보상할 수 있는 알고리즘을 제안하였으며, 시뮬레이션을 수행하여 성능을 확인하였다. 그리고 병렬형 능동필터대신 정류기를 사용하여 실험한 결과 고조파 제거에 효과가 있음을 입증하였다. 앞으로는 병렬형 능동필터가 무효전력을 보상할 수 있도록 기능을 추가함으로서 제안된 통합형 전력품질 개선장치가 고조파 제거뿐만 아니라 역률 개선도 할 수 있는 연구를 수행할 것이다.

감사의 글

본 연구는 기초전력공학 공동연구소(제00-047호)의 지원으로 수행된 결과의 일부임

[참 고 문 헌]

[1] H. Akagi, "New trends in active filter for power conditioning", IEEE Trans. Ind. Applicat, vol. 32, no. 6, pp.1312-1322, 1996.

[2] Bhim Singh, "A Review of Active Filters for Power Quality Improvement", IEEE Trans. Ind. Electron, vol. 46, no. 5, pp. 960-971, 1999.

[3] 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.

[4] H. Fujita, H. Akagi, "The Unified Power Quality Conditioner: The Integration of Series- and Shunt-Active Filters", IEEE Trans, power electron, vol. 13, no. 2, pp. 315-322, March 1998.