

통합형 전력품질 개선장치에 관한 기초 연구

이 현 옥 · 오 성 철 · 노 대 석
한국기술교육대학교

The Basic Study on Unified Power Quality Conditioner

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

Abstract - This paper deals with single-phase unified power quality conditioner, 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. In order to verify the performance of the proposed conditioner, computer simulations using MATLAB/SIMULINK were demonstrated. The results confirm that the proposed conditioner shows excellent performance to eliminate the harmonics and voltage flickers generated at the single-phase nonlinear load.

1. 서 론

모든 산업이 고도화되고 생활환경이 향상됨에 따라 반도체 전력변환 기기가 광범위하게 이용되고 있다. 이로 인하여 비선형 특성을 갖는 기기가 급증하여, 고조파, 역률 저하, 순시전압변동 등 많은 문제점들을 일으키고 있는 실정이다. 특히, 고조파는 고조파 발생 기기와 공동의 전원선을 사용하는 다른 전기 기기에 장애를 일으키고, 효율을 감소시키는 등 파급 효과가 크다. 이와 같이, 고조파 장애를 감소시키기 위하여 과거에는 수동필터를 주로 사용하였으나, 최근에는 고조파 발생원이 대용량화, 광역화, 다양화되면서, 보다 경제적이고 효과적인 대응책이 요구되어 왔고, 이에 대한 대안으로 능동필터에 관한 연구가 활발히 이루어지고 있다.⁽¹⁾

능동필터는 비용 문제와 제어의 복잡성 때문에 상업적으로 이용되는데 문제점을 가지고 있었으나, 전력용 반도체 소자의 가격 저하와 제어능성의 향상으로 인하여 실용성을 가지게 되었다.⁽²⁾ 능동필터는 계통의 비선형 부하로부터 발생된 고조파 전류를 보상하기 위한 전력변환 시스템으로서, 구성 형태에 따라 병렬형 능동필터와 직렬형 능동필터, 하이브리드형 능동필터로 나눌 수 있다. 일반적으로 병렬형 능동필터는 DC단 인덕터를 가지는 싸이리스터 정류기와 같은 고조파 전류원 부하에 대한 고조파 성분을 보상할 때 적용되어지며, 직렬형 능동필터는 DC단 커패시터를 가지는 다이오드 정류기와 같은 고조파 전압원 부하에 대한 고조파 성분을 보상할 때 적용된다. 또한, 하이브리드형 능동필터는 수동필터와 능동필터의 조합에 의하여, 고조파 보상 특성의 극대화를 꾀하고, 보상 역할을 분담함으로써 능동필터의 용량을 저감시킬 수 있다는 장점을 가지고 있다.

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 능동필터 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, 모델계통에 대하여 시뮬레이션을 수행하였으며, 전력품질 개선에 효과적임을 확인하였다.

2. 시스템 모델링

그림 1은 본 논문에서 제안한 통합형 전력품질 개선장치의 시스템 구성도를 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.

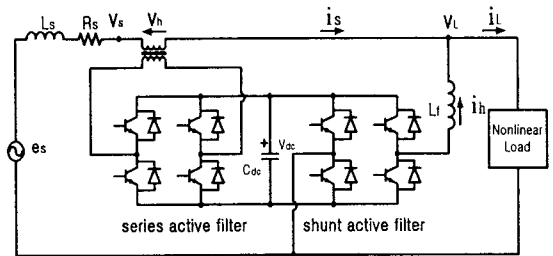


그림 1 통합형 전력품질 개선장치의 구성도

본 논문에서 제안한 시스템은 전원측과 직렬형 능동필터, 병렬형 능동필터의 세 부분으로 나누어 모델링하였다. 먼저, 전원측은 키르히호프의 법칙에 따라 다음 식과 같이 나타낼 수 있다.

$$v_L = e_s - L_s \frac{di_s}{dt} - R_s i_s - v_h \tag{1}$$

$$i_s = i_L - i_h \tag{2}$$

여기서, v_L : 부하측의 순시전압

직렬 변압기 권선의 누설 인덕턴스와 누설 저항을 L_{st}, R_{st} 로 표현하고 직렬형 능동필터의 스위칭 함수를 S_1 이라 하면 직렬형 능동필터는 다음 식과 같이 표현할 수 있다.

$$v_h = L_{st} \frac{di_s}{dt} + R_{st} i_s + S_1 v_{dc} \tag{3}$$

여기서, 직렬 변압기의 권수비는 1로 한다.

병렬형 능동필터의 스위칭 함수를 S_2 로 표현하고 필터 인덕턴스를 L_f 라 하면 병렬형 능동필터는 다음 식으로 표현할 수 있다.

$$L_f \frac{di_h}{dt} = -v_L + S_2 v_{dc} \tag{4}$$

여기서, DC link 전압은 다음 식과 같이 나타낼 수 있다.

$$\frac{dv_{dc}}{dt} = \frac{i_{dc}}{C_{dc}} = \frac{1}{C_{dc}}(S_1 i_s - S_2 i_h) \quad (5)$$

3. 제어 원리

3.1 능동필터의 제어 원리

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

$$v_s(t) = V_{sm} \sin(\omega t) \quad (6)$$

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.

$$i_s(t) = \sum_{n=1}^{\infty} I_n \sin(n\omega t + \theta_n) \\ = I_1 \sin(\omega t + \theta_1) + \sum_{n=2}^{\infty} I_n \sin(n\omega t + \theta_n) \quad (7)$$

식 (6)의 $v_s(t)$ 전압과 동위상인 기준 정현파 신호를 다음 식과 같이 가정 할 수 있다.

$$i_r(t) = \sin(\omega t) \quad (8)$$

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

$$I_x = \frac{1}{T} \int_0^T i_s(t) i_r(t) dt \\ = I_1 \cos \theta_1 \quad (9)$$

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

$$i_{s'}(t) = I_x i_r(t) \\ = I_1 \cos \theta_1 \sin(\omega t) \quad (10)$$

이때, 병렬형 능동필터가 보상해야할 전류는 다음 식과 같다.

$$i_h(t) = i_s(t) - i_{s'}(t) \\ = \sum_{n=1}^{\infty} I_n \sin(n\omega t + \theta_n) - I_1 \cos \theta_1 \sin(\omega t) \quad (11)$$

본 논문에서는 병렬형 능동필터가 전원측 전류의 기본파 성분의 실수부 $i_{s'}(t)$ 를 추종하도록 하여 무효전력보상과 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.

$$v_h(t) = v_L^*(t) - v_L(t) \quad (12)$$

3.2 DC link 전압제어

이상적인 경우, 능동필터는 자체가 소모하는 전력이

영이나, 실제의 경우는 스위칭 소자 및 커패시터 누설전류에 의한 손실이 있으므로 약간의 유효전력이 전원에서부터 공급되어야 한다. 만일 유효전력이 전원에서 공급되지 않으면 DC link 전압은 감소하여 고조파 보상이 불가능해진다. 이 문제는 전원전류의 크기를 조절함으로써 해결할 수 있다.

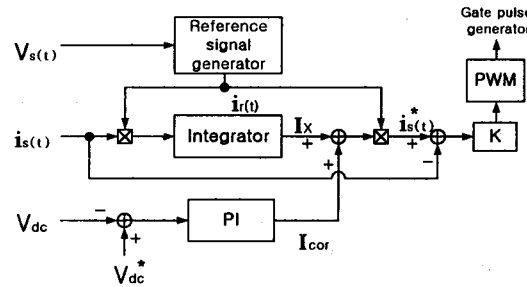
그러므로 식 (10)은 DC link 전압을 일정하게 유지할 수 있도록 DC link 전압을 감지하여 일정 기준치를 병렬형 능동필터가 추종하도록 전원측 기준전류를 다음과 같이 수정해야 한다.

$$i_s^*(t) = (I_1 \cos \theta_1 + I_{cor}) \sin(\omega t) \quad (13)$$

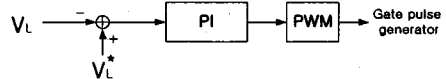
여기서, I_{cor} : DC link 전압변동에 대한 보상전류

4. 제어 알고리즘

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



(a) 병렬형 능동필터의 제어회로



(b) 직렬형 능동필터의 제어회로

그림 2 제어 시스템 블록 다이어그램

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_x 와 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.

5. 시뮬레이션

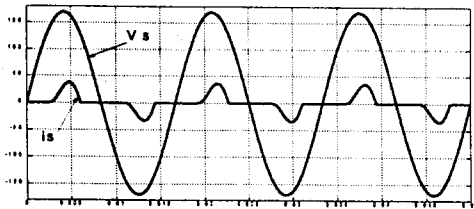
본 논문에서 제안한 통합형 전력품질 개선장치의 타당성을 검증하기 위하여 Simulation tool인 MATLAB/SIMULINK를 사용하여 실행하였다. 비선형 부하는 저항과 커패시터가 병렬로 연결된 다이오드 정류기 부하를 사용하였으며, 시스템 파라미터는 표 1에 제시하였다.

표 1 시스템 파라미터

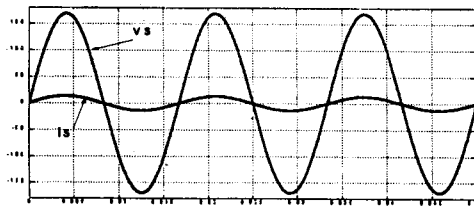
Parameter	Value
입력전압 (e_s)	120 V, 60 Hz
전원측 임피던스(R_s, L_s)	1 m Ω , 1 mH
부하 임피던스(C_d, R_{load})	1000 μ F, 20 Ω
직렬 변압기의 누설	4 mH
인덕터스와 저항(L_{st}, R_{st})	0.5 Ω
필터 인덕턴스 (L_f)	5 mH
DC link 커패시터(C_{dc})	2000 μ F
DC link 전압(V_{dc})	240 V

그림 3 (a)는 보상 전 전원측 전압과 전류 파형으로 전류 파형에 매우 많은 고조파가 포함되어 있음을 알 수 있다. 그림 3 (b)는 보상 후의 전원측 전압과 전류 파형으로 전류 파형이 정현파에 가깝고 위상이 전압과 일치함을 알 수 있다. 이것은 고조파 제거뿐만 아니라 무효 전력까지 보상되었음을 보여준다. 그림 3 (c)는 보상 전 부하측 전압 파형이고, 그림 3 (d)는 보상 후의 부하측 전압 파형으로 고조파가 대부분 제거된 깨끗한 정현파 파형을 알 수 있다.

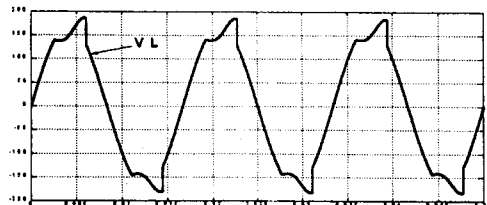
또한, 그림 4는 전원측에서 순시 전압강하가 발생한 경우, 부하측의 전압 파형이 보상되어 일정한 정현파 파형을 얻을 수 있음을 확인할 수 있었다.



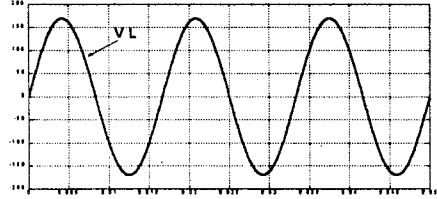
(a) 보상 전 전원측 전압과 전류



(b) 보상 후 전원측 전압과 전류

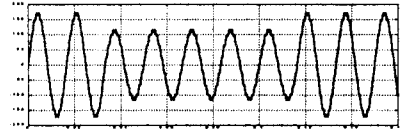


(c) 보상 전 부하측 전압

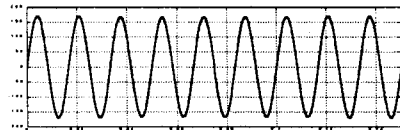


(d) 보상 후 부하측 전압

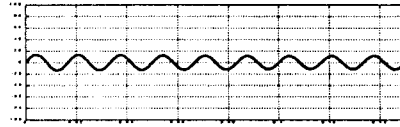
그림 3 고조파 보상전후의 전압과 전류파형



(a) 전원측 전압



(b) 보상된 부하측 전압



(c) 보상된 전원측 전류

그림 4 순시전압강하 보상전후의 전압파형

6. 결 론

본 논문에서는 부하에서 발생하는 고조파와 무효전력을 동시에 보상하도록 직렬형 능동필터와 병렬형 능동필터를 조합한 통합형 전력품질 개선장치를 제안하였으며, 시뮬레이션 결과를 통하여 제안한 방법의 타당성을 입증하였다. 즉, 전원측 전류의 위상을 전원측 전압에 강제로 추종시킴으로써 전원품질 개선뿐만 아니라 역률 개선에 대한 효과가 있었으며, 전원측의 순시전압강하에도 매우 효과적임을 알 수 있었다.

앞으로는 인버터가 이상적이라는 가정 하에서 이루어진 시뮬레이션을 실제 제동에 적용하여 통합형 전력품질 개선장치의 성능이 우수함을 확인하고자 한다.

감사의 글

본 연구는 한국과학재단 목적기초연구(과제번호: 2000-1-30200-006-3) 지원으로 수행된 결과의 일부임

[참 고 문 헌]

- [1] H. Akagi, "New trends in active filter for power conditioning", IEEE Trans. Ind. Appl., 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.