

3상 3선식 시스템의 고조파 저감을 위한 직렬형 능동전력필터에 관한 연구

우원명*, 한운석*, 김영석*, 원충연**, 최세완***

*인하대학교 전자·전기·컴퓨터 공학부, **성균관대학교 전기공학과,

***서울산업대학교 제어계측공학과

A Study on the Series Active Power Filter for Harmonic Reduction of 3-Phase 3-Wire System

Wonmyung Woo*, Yoonseok Han*, Youngseok Kim*,
Chungyuen Won**, Sewan Choi***

*Inha Univ. , **Sung Kyun Kwan Univ. , ***Seoul National Univ. of Tech.

ABSTRACT

In this paper, we propose a series active power filter and a simple calculation method acquiring the reference voltage. A series active power filter is suitable to suppress harmonics produced by voltage type harmonic source such as a diode rectifier with filter capacitor on the DC side. The proposed series active power filter system is applied to 3-phase 3-wire power system including the voltage type harmonic source. Experimental results obtained from a laboratory model are shown to verify the viability and effectiveness of the proposed system.

1. 서론

전력전자 기기는 전력계통에서 부하에 전력을 전달하는 과정에서 비선형 부하로 작용하여 전원측에 심각한 고조파를 발생하는 요인으로 작용한다. 능동전력필터는 이러한 비선형 부하로부터 발생한 고조파 성분과 무효전력을 보상하기 위한 전력변환 시스템이다^[1]. 능동전력필터는 수동필터에 비해 빠르고 정확한 보상특성을 가지기 때문에 오랜 기간 동안 연구가 행해져 왔으며, 여러 가지 결과가 제시되고 있다^{[2],[3]}. 능동전력필터는 시스템 구성에 따라 크게 병렬형 능동전력필터와 직렬형 능동전력필터, 하이브리드형 능동전력필터로 나뉘어진다. 지금까지 능동전력필터는 병렬형 능동전력필터가 주를

이루었고, 실제 상용화 단계에까지 이르렀다^[4].

그러나 병렬형 능동전력필터는 전류원으로 동작하는 유도성 부하의 고조파보상에는 탁월하지만, DC측에 필터 커패시터를 갖는 다이오드 정류기와 같은 전압원으로 작용하는 용량성 부하에 적용하게 되면, 능동전력필터가 주입하는 전류가 부하측에도 흐르게 되어 고조파를 완전 제거할 수 없음은 물론 다이오드 정류기에 흐르는 고조파 전류를 증대시켜 과전류를 초래할 위험이 있다. 이러한 단점을 보완하기 위해 교류측에 직렬 리액터를 삽입하는 방법을 사용하기도 하나, 이는 경제적인 면 또는 전압강하가 생기는 문제 등으로 적절한 대응책이라 할 수 없다. 최근 전압형 인버터를 적용하는 산업 기기나 가전제품 보급의 증가는 이러한 용량성 부하의 증가를 가져오고 있어, 이로 인해 발생하는 고조파의 문제를 간과할 수 없는 실정이다.

본 논문에서는 전압원으로 작용하는 용량성 부하에 적합한 직렬형 능동전력필터의 새로운 제어방법을 제안하고, 제안된 고조파 보상기법의 타당성을 실험을 통해 확인하였다.

2. 제안된 직렬형 능동전력필터

2.1 시스템 구성

그림 1은 제안된 직렬형 능동전력필터의 전체 시스템 구성을 나타낸다. 직렬형 능동전력필터의 주회로는 3상 전압형 PWM 인버터이며, AC전원과 비선형 부하 사이에 3개의 단상 결합 변압기를 통해 계통에 직렬 접속된다. 비선형 부하로는 DC 필터 커패시터를 갖는 3상 전 브릿지 다이오드 정류기를 사용하며, 이 부하는 고조파 전압원으로 동작

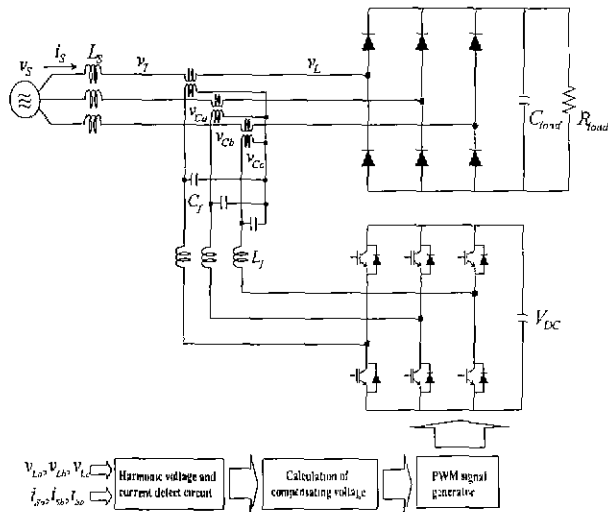


그림 1 제안된 직렬형 능동전력필터 시스템
Fig. 1 Proposed series active power filter system

하게 된다. 따라서, 직렬형 능동전력필터는 부하에 의해 발생하는 고조파를 차단하기 위한 전압을 결합 변압기를 통해 계통에 유기시켜, 전원측에 정현파에 가까운 전압과 전류를 얻게 한다.

2.2 보상전압의 결정

기존의 순시 무효전력은 부하에 의해 발생된 양을 의미했지만, 본 논문에서는 능동전력필터로부터 발생된 전력으로 순시 무효전력을 정의한다. 이는 전력시스템의 어느 한 상을 통해 능동전력필터로 들어오는 전력은 다른 상으로 즉시 공급되기 때문에, 능동전력필터가 유효전력을 발생하지 않게 되므로 가능해진다.

따라서, 정의되는 순시 무효전력 q_k 는 능동전력필터 각 상에서 발생하는 전력으로 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$q_k = v_{Ck} \cdot i_{Sk} \quad (1)$$

여기서, k 는 3상의 각 상을 나타내는 a, b, c. v_{Ck} 는 능동전력필터가 생성하는 각 상의 보상전압, i_{Sk} 는 각 상의 전원전류

능동전력필터가 순시 유효전력을 생성하지 않는다고 하면 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$v_{Ca}i_{Sa} + v_{Cb}i_{Sb} + v_{Cc}i_{Sc} = 0 \quad (2)$$

이때, 능동전력필터의 보상전압은 식 (2)의 조건 하에서, 다음에서 정의하는 성능함수(Performance function)를 최소화시키는 값으로 구하게 된다.

$$L = (v_{La} - v_{Ca})^2 + (v_{Lb} - v_{Cb})^2 + (v_{Lc} - v_{Cc})^2 \quad (3)$$

여기서, v_{Lk} 는 각 상의 부하전압

그림 1과 같은 3상 3선식 전력계통의 경우 중성선이 없으므로, 전압과 전류의 영상분이 존재하지 않는다. 따라서, 능동전력필터에서 발생하는 보상전압은 다음 식을 만족한다.

$$v_{Ca} + v_{Cb} + v_{Cc} = 0 \quad (4)$$

그러므로, 3상 3선식 시스템에서 고조파 전압원으로 동작하는 용량성 부하에 의해 발생된 고조파를 직렬형 능동전력필터에서 보상하기 위해서는, 식 (2)와 식(4)를 만족하고 식(3)의 성능함수를 최소화하는 v_{Ca} , v_{Cb} , v_{Cc} 를 식(5)를 통해 유도해 내야한다.

$$\frac{dL}{dv_{Ca}} = 0, \quad \frac{dL}{dv_{Cb}} = 0, \quad \frac{dL}{dv_{Cc}} = 0 \quad (5)$$

식(5)를 통해 유도된 v_{Ca} , v_{Cb} , v_{Cc} 는 제안된 직렬형 능동전력필터의 보상지령전압으로 다음과 같다.

$$\begin{aligned} v_{Ca} &= \frac{(i_{Sb} - i_{Sc}) \cdot q}{2(i_{Sa}^2 + i_{Sb}^2 + i_{Sc}^2 - i_{Sa}i_{Sb} - i_{Sb}i_{Sc} - i_{Sc}i_{Sa})} \\ v_{Cb} &= \frac{(i_{Sc} - i_{Sa}) \cdot q}{2(i_{Sa}^2 + i_{Sb}^2 + i_{Sc}^2 - i_{Sa}i_{Sb} - i_{Sb}i_{Sc} - i_{Sc}i_{Sa})} \\ v_{Cc} &= \frac{(i_{Sa} - i_{Sb}) \cdot q}{2(i_{Sa}^2 + i_{Sb}^2 + i_{Sc}^2 - i_{Sa}i_{Sb} - i_{Sb}i_{Sc} - i_{Sc}i_{Sa})} \end{aligned} \quad (6)$$

여기서,

$$q = (i_{Sb} - i_{Sc})v_{La} + (i_{Sc} - i_{Sa})v_{Lb} + (i_{Sa} - i_{Sb})v_{Lc}$$

3. 실험결과

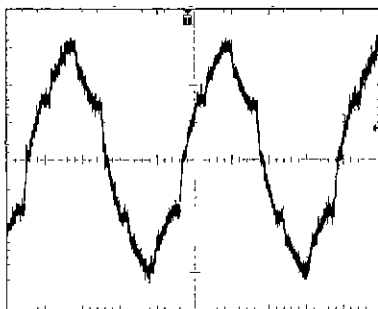
제안된 직렬형 능동전력필터의 실험을 위해, 표 1의 회로정수를 갖는 시스템을 제작하였다. 직렬형 능동전력필터는 3상 전 브릿지 인버터로써, 600V/75A급 IGBT를 사용하여 구성하였다. 보상지령전압의 정확한 연산을 위해 DSP(TMS320C31)를 사

용하였으며, 샘플링시간은 $143 \mu\text{sec}$ 이다.

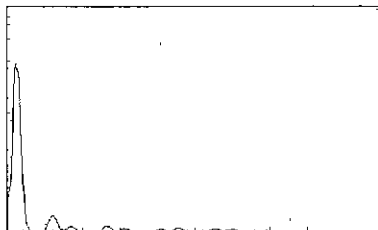
게이트 인가신호는 Co-processor(ADMC201)를 사용하여 구현하였다. 또한, 인버터의 스위칭 리플을 저감시키기 위해 출력단에 LC 수동필터를 연결하였다.

표 1 시스템 사양
Table 1 System parameters

전원전압	110 [Vrms] 60 [Hz]
L_S	0.65 [mH]
결합변압기 권수비	1 : 1
C_{load}	2400 [μF]
R_{load}	25 [Ω]
C_f	1 [μF]
L_f	3.92 [mH]
인버터 DC링크 콘덴서	2350 [μF]
스위칭 주파수	7 [kHz]



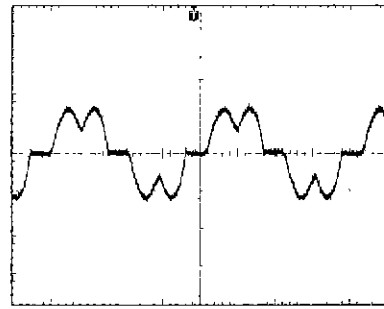
(a)보상전 a상 전원측 전압 (v_{Ta})
[50V/div, 4ms/div]



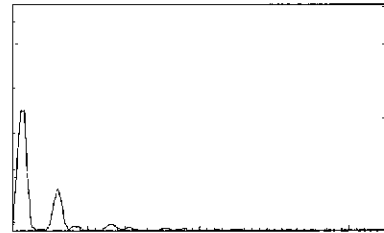
(b) 보상전 a상 전원측 전압 (v_{Ta})
FFT [20Vrms/div, 250Hz/div]

그림 2 보상전 a상 전원측 전압 (v_{Ta})과 FFT결과

Fig. 2 Voltage v_{Ta} and its FFT before compensation



(a) 보상전 a상 전원전류 (i_{Sa})
[10A/div, 4ms/div]



(b) 보상전 a상 전원전류 (i_{Sa})
FFT [2Arms/div, 250Hz/div]

그림 3 보상전 a상 전원전류 (i_{Sa})와 FFT결과

Fig. 3 Source current i_{Sa} and its FFT before compensation

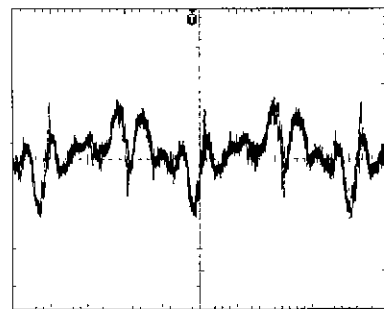
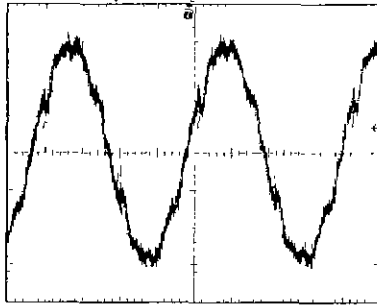


그림 4 a상 보상전압 (v_{Ca})
[50V/div, 4ms/div]

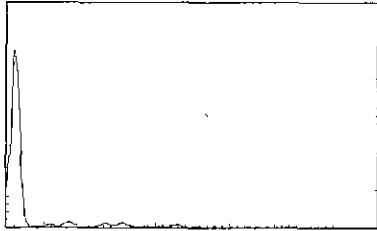
Fig. 4 Compensating voltage v_{Ca}

그림 2와 그림 3은 직렬형 능동전력필터가 동작되기 전 a상 전원측 전압(v_{Ta})과 전원전류 파형을 보여주며, 이에 대한 각각의 FFT(Fast Fourier Transform)결과를 나타내었다. 직렬형 능동전력필터에서 발생된 보상전압은 그림 4에서 보여준다. 직렬형 능동전력필터가 생성하는 보상전압은 부하에 의해 발생된 고조파 전류를 차단하여 전원전류를 정현파의 형태로 보상하며, 이로 인해 전원측

전압의 왜형 또한 감소시키게 된다. 그림 5와 그림 6은 직렬형 능동전력필터가 동작된 후 보상된 전원측 전압과 전원전류 파형이며, 이때의 FFT 결과를 함께 나타내었다. 보상전의 FFT결과에 비해 고조파 성분이 감소되었음을 확인할 수 있다.



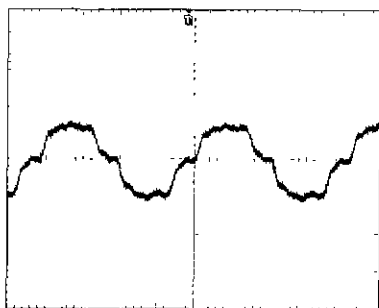
(a) 보상후 a상 전원측 전압 (v_{Ta})
[50V/div, 4ms/div]



(b) 보상후 a상 전원측 전압 (v_{Ta})
FFT [20Vrms/div, 250Hz/div]

그림 5 보상후 a상 전원측 전압 (v_{Ta})과 FFT결과

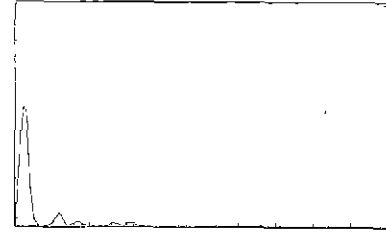
Fig. 5 Voltage v_{Ta} and its FFT before compensation



(a) 보상후 a상 전원전류 (i_{Sa})
[10A/div, 4ms/div]

4. 결론

본 논문에서는 기존의 순시 무효전력 이론을 적용한 직렬형 능동필터의 보상지령전압 연산방법을 사용하지 않는, 새로운 알고리즘을 제안하였다. 제안하는 방법에 의해 발생된 직렬형 능동전력필터의



(b) 보상후 a상 전원전류 (i_{Sa})
FFT
[2Arms/div, 250Hz/div]

그림 6 보상후 a상 전원전류 (i_{Sa})와 FFT결과

Fig. 6 Source current i_{Sa} and its FFT after compensation

보상전압이 DC측에 필터 커패시터를 갖는 다이오드 정류기와 같은 용량성 부하의 고조파 보상에 적용될 수 있음을 실험을 통해 확인하였다.

추후 연구과제로는 인버터의 스위칭 손실 보상을 위한 DC링크 일정 전압제어와 인버터의 휴지시간 최소화 알고리즘의 적용하는 것이며, 이를 통해 전원전류의 총 고조파 왜형률(THD ; Total Harmonic distortion)을 5% 이내로 실현하는 것이다.

본 연구(관리번호 98-중-03)는 한국전력공사의 지원에 의하여 기초전력공학 공동연구소 주관으로 수행되었음

참 고 문 헌

- [1] H. Akagi, Y. Kanazawa, and A. Nabae, "Instantaneous reactive power compensators comprising switching devices without energy storage elements," IEEE Trans. on Industry Applications, vol.20, no.3, pp.625-630, 1984.
- [2] T. Furuhashi, S. Okuma, Y. Uchiakwa, "A Study on the Theory of Instantaneous Reactive Power," IEEE Trans. on Ind. Elec. vol.37, no.1 pp.86-90, 1990
- [3] F Z Peng et al., "A New Approach to Harmonic Compensation in Power Systems - A Combined System of Shunt Passive and Series Active Filters", IEEE Trans. Industry Applications, Vol. 26, No. 6, pp.983-990, 1990.
- [4] Qun Wang et al., "Voltage Type Harmonic Source and Series Active Power Filter Adopting New Control Approach", IECON'99 Conf. Proc. Vol. 2, pp.843-848, 1999.