

성능함수를 이용한 직렬형 능동전력필터의 제어알고리즘에 관한 연구

고수현 김진선 김영석
인하대학교 전기공학과

A Study of Control Algorithm For Series Active Power Filter Using Performance Function

Soo-Hyun Ko, Jin-Sun Kim, and Young-Seok Kim
Dept. of Electrical Eng., INHA Univ.

ABSTRACT

This paper suggests the control algorithm of a 3-phase 3-wire series active power filters which have harmonic voltage source and harmonic current source. This suggested control algorithm can compensate harmonics which are generated by nonlinear load such as diode or thyristor converter and reactive power in 3-phase 3-wire power distribution system. This control algorithm extracts a compensation voltage reference from performance function without phase transformation. Therefore this control algorithm is simpler than any other conventional control algorithm. 3-phase 3-wire series active power filter and hybrid active power filter is manufactured and experiments are carried out for harmonic voltage source and harmonic current source to verify the effectiveness of presented control algorithm. Experimental results are presented in this paper, as well.

1. 서 론

전동기 구동시스템, SMPS, 컴퓨터시스템 등 사이리스터나 다이오드 정류기와 같은 반도체 전력변환장치를 사용하는 부하는 비선형 부하로 동작하여 전원측에 심각한 고조파를 발생시키는 주요한 원인이 된다. 이러한 고조파 전류는 전원전압의 왜곡 및 전기기기, 케이블, 진상 콘덴서 등 각종 전력설비들의 절연파괴나 수명 단축을 야기할 수 있다. 그리고, 계측장비와 같은 각종 전자장비의 오동작이나 EMI 현상을 야기하며, 통신 시스템에 간섭을 일으키는 등의 전자환경적인 문제를 야기하게 된다. 또한, 전동기에 이상 진동 토크를 발생시키고 철손,

동손 등의 손실을 증대시키게 된다.

이러한 고조파장해의 문제를 해결하기 위한 방법으로 여러 형태의 수동필터와 직·병렬 능동필터가 소개되어 왔다.^[1-4]

고조파제거를 위해 사용되는 수동필터는 저가이지만 특정 차수의 고조파만을 선택적으로 보상할 수 있고, 전원 측 임피던스와 직렬공진을 일으킬 가능성을 항상 내재하고 있다. 이러한 수동필터의 단점을 보완하기 위해 능동필터가 개발되었다. 능동전력필터에는 보상 전류를 주입해주는 병렬 형과^[1] 보상전압을 주입해주는 직렬형^[3], 그리고 수동필터와 능동필터를 병용하는 방식등^[2]이 주로 개발되어 왔다.

이러한 능동전력필터 중 지금까지는 주로 병렬형 능동전력필터에 대한 연구가 활발히 진행되어왔고, 산업현장에 널리 채택되었다. 하지만, 이러한 병렬형 능동전력필터는 고조파 전류원 보상에 적합한 방식이다.^[4] 따라서, 급속히 증가하고 있는 고조파 전압원에 대한 보상을 효과적으로 수행할 수 있는 직렬형 능동전력필터에 대한 중요성이 점점 증가하고 있다.

따라서, 본 논문에서는 고조파 전류원 뿐만 아니라 고조파 전압원 부하를 가지는 3상 3선식 전력시스템에서 고조파와 무효전력을 보상해 줄 수 있는 직렬형 능동필터에 대한 제어 알고리즘에 대해서 다룬다. 이 제어법은 상변환 없이 보상기준전압을 직접 추출해 냄으로써 기존의 제어법보다 더 간단하고, 보상기준전압을 연산해 내는 시간을 단축시킬 수 있기 때문에 무효전력의 실시간 제어에 더 근접할 수 있는 요건을 제공해 주어 능동전력필터의 성능개선에 기여하게 된다. 제안된 제어알고리즘의 유효성을 입증하기 위해서 고조파 전압원 부하와 고조파 전류원 부하를 구성하여 실험을 수행하였고, 실험결과를 제시하였다.

2. 본 론

2.1 보상원리

본 논문에서 제안하는 알고리즘에서는 순시무효 전력을 부하에서 발생하는 무효전력 대신에 능동전력필터에서 발생한 각 상의 전력을 순시 무효전력으로 정의 한다. 이것은 능동전력필터가 순시 유효 전력을 발생하지 않기 때문에 유효하다. 따라서 순시 무효전력 q_k 는 다음 식 (1)과 같이 나타낼 수 있다.

$$q_k = v_{Ck} \cdot i_{Sk} \quad (k = a, b, c) \quad (1)$$

직렬형 능동전력필터는 순시 유효전력을 발생하지 않으므로 능동필터에서 발생하는 모든 전력은 부하로 전달되지 않고 상사이에서 회전하는 무효전력성분이 된다. 따라서, 식 (1)을 다음 식(2)와 같이 능동전력필터에서 발생하는 전력의 합을 0으로 놓을 수 있다.

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

본 논문에서 다루는 3상3선식 전력계통에서 전압과 전류의 영상분이 존재하지 않는다고 하면, 직렬형 능동전력필터에서 발생하는 보상 전압은 다음 식 (3)을 만족한다.

$$v_{Ca} + v_{Cb} + v_{Cc} = 0 \quad (3)$$

직렬형 능동전력필터의 보상 전압은 식 (2)와 식 (3)을 만족하면서, 다음에 정의하는 성능 함수를 최소화하는 전압으로 결정된다.

$$L = (v_{La} - v_{Ca})^2 + (v_{Lb} - v_{Cb})^2 + (v_{Lc} - v_{Cc})^2 \quad (4)$$

식 (4)의 성능함수에서 우변의 각 항들은 각 상의 부하 입력전압과 보상전압의 차의 제곱의 형태를 갖기 때문에 성능함수가 최소가 됨은 전원측 전압의 고조파 성분이 최소가 됨을 의미한다. 이 성능함수를 최소로 만드는 직렬형 능동전력필터의 보상 전압 v_{Ca} , v_{Cb} , v_{Cc} 는 식 (2)와 식 (3)의 조건과 식 (5)의 미분식을 통해 유도된다.

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

식 (2), (3), (5)를 통해 유도된 v_{Ca} , v_{Cb} , v_{Cc} 는 제안된 직렬형 능동전력필터의 보상 지령 전압으로 다음 식 (6)과 같이 구해진다.

$$v_{Ca} = \frac{\sqrt{3}(i_{Sb} - i_{Sc}) \cdot q}{2(i_{Sa}^2 + i_{Sb}^2 + i_{Sc}^2 - i_{Sa}i_{Sb} - i_{Sb}i_{Sc} - i_{Sc}i_{Sa})}$$

$$v_{Cb} = \frac{\sqrt{3}(i_{Sc} - i_{Sb}) \cdot q}{2(i_{Sa}^2 + i_{Sb}^2 + i_{Sc}^2 - i_{Sa}i_{Sb} - i_{Sb}i_{Sc} - i_{Sc}i_{Sa})} \quad (6)$$

$$v_{Cc} = \frac{\sqrt{3}(i_{Sa} - i_{Sb}) \cdot q}{2(i_{Sa}^2 + i_{Sb}^2 + i_{Sc}^2 - i_{Sa}i_{Sb} - i_{Sb}i_{Sc} - i_{Sc}i_{Sa})}$$

여기서,

$$q = \frac{1}{\sqrt{3}}((i_{Sb} - i_{Sc})v_{La} + (i_{Sc} - i_{Sa})v_{Lb} + (i_{Sa} - i_{Sb})v_{Lc})$$

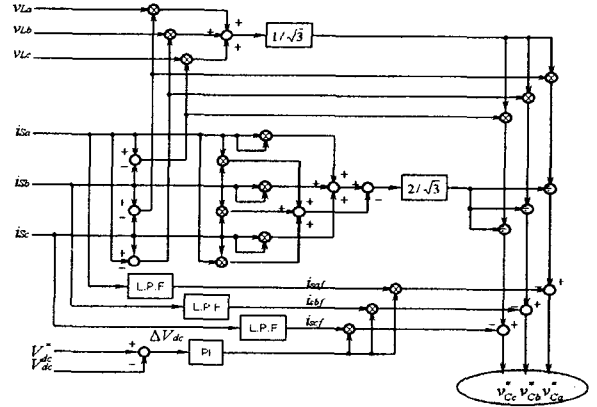


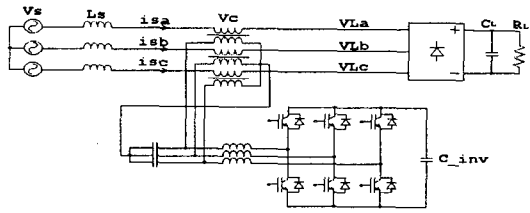
그림 1. 제안된 제어알고리즘의 블록도
Fig 1. block diagram of suggested control algorithm

그림 1은 3상 3선식 직렬형 능동필터의 제어 알고리즘에 대한 블록도이다. 3상 부하전압과 3상 전원전류로부터 식 (6)에 의해서 보상기준전압을 구해내었고, 인버터의 dc-link 전압제어를 위해서 PI 제어기를 추가하였다. V_{dc} 는 PT를 통해 받아온 실제 인버터의 dc-link 전압이고, V_{dc}^* 는 인버터 dc-link의 기준전압을 의미한다.

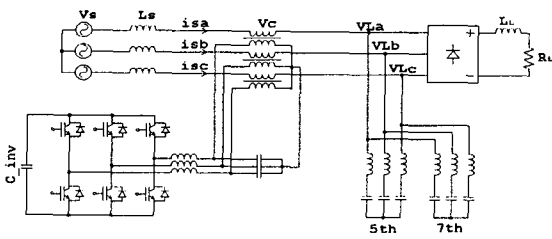
2.2 시스템의 구성

그림 2는 제안된 알고리즘을 적용하기 위해 구성한 3상 3선식 직렬형 능동전력필터와 병렬수동필터와 직렬형 능동전력필터의 결합형인 하이브리드형 능동전력필터의 회로도이다. 3상 3선식 능동전력필터에서는 3상 다이오드 정류기에 고조파 전압원으로 동작하는 RC 부하를 병렬 연결하여 시스템을 구성하였고, 병렬수동필터와 직렬형 능동전력필터의 결합시스템에서는 3상 다이오드정류기의 dc단에 RL 부하를 직렬 연결하여 고조파 전류원 부하를 구성하였다.

직렬형 능동전력필터는 3상 전압형 PWM 인버터를 교류 전원과 비선형 부하 사이에 3개의 결합변압기로 계통에 직렬 접속하여 구성하였다. 또한, 인버터의 출력 측에는 스위칭 리플을 저감시키기 위한 LC필터를 구성하였다.



(a) 3상 3선식 직렬형 능동전력필터



(b) 하이브리드형 능동전력필터

그림 2. 능동전력필터 회로도

Fig 2. Active power filter circuits

그림 3에 직렬형 능동필터의 제어회로에 대한 블록다이어그램을 나타내었다. 센싱회로를 통해서 3상부하전압과 3상전류, 인버터 dc-link 전압을 받아오게 되고, 이 값들을 통해서 제안된 알고리즘에 의해 보상기준전압이 연산되어진다. 연산된 보상기준전압은 다시 D/A 변환기를 통해 아날로그 신호로 변환되어 PWM 발생회로로 넘겨지게 되고, PWM 회로에서 발생된 제어 신호가 인버터 구동회로를 거쳐 인버터를 구동시켜주도록 제어회로를 구성하였다. IGBT drive IC를 사용해서 게이트 구동회로와 보호회로를 구성하였고, TI사의 DSP를 사용하여 20(KHz)로 인버터를 구동하였다.

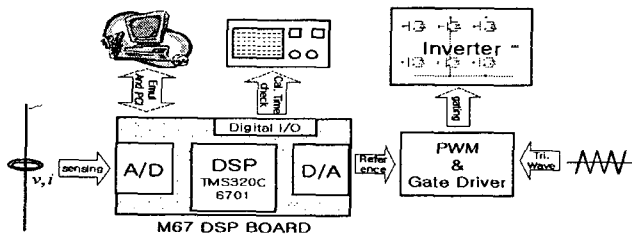


그림 3. 제어회로에 대한 블록도

Fig 3. block diagram of control circuit

표 1에 구성된 시스템의 회로정수 값을 나타내었다. 3상 3선식 직렬형 능동전력필터인 경우는 30옴, 2400(uF)의 RC 부하를 갖는 3상 다이오드 정류기 부하를 사용하였고, 실효치 110(V)의 전원을 인가하였다. 하이브리드형인 경우에는 3상 다이오드정류기에 30옴 15(mH)의 RL부하를 직렬로 연결하여 고조파 전류원

을 구성하였다. 인버터 DC-link 커패시터는 2350 (μF)을 썼고, 0.5(μF), 4(mH)의 커패시터와 인덕터를 써서 인버터의 스위칭 리플 저감을 위한 LC필터를 구성하였다.

표 1. 시스템 회로정수

Table 1. System circuit parameter

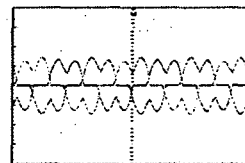
	3P3W RC	3P3W RL
전원전압	110[V]	110[V]
전원인덕터	0.1[mH]	0.1[mH]
변압기권수비	1:2	1:2
부하커패시터	2400[uF]	.
부하인덕터	.	15[mH]
부하저항	30[ohm]	30[ohm]
dc-link 커패시터	2350[uF]	2350[uF]
LC 필터 인덕터	4[mH]	4[mH]
LC 필터 커패시터	0.5[uF]	0.5[uF]

표 2. 병렬 수동필터 회로정수

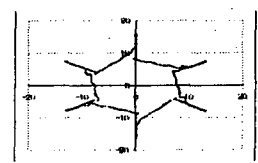
Table 2. Parallel passive filter parameter

5th 수동필터	인덕터	2[mH]
	커패시터	140[uF]
7th 수동필터	인덕터	2[mH]
	커패시터	70[uF]

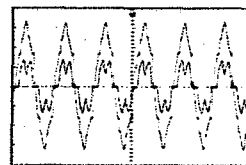
2.3 실험결과



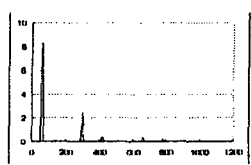
(a) 10A/div, 4ms/div



(b)



(c)10A/div, 50V/div



(d)

그림 4. 고조파 전압원에 대한 보상전 파형들

Fig 4. Before compensation waveforms for harmonic voltage source

그림 4와 그림 5는 고조파 전압원에 대한 보상 전과 보상후의 파형들이다. 상전류의 THD는 보상 전 약 33%에서 보상후 4.8%로 개선되었고, 역률 역시 보상전 0.91에서 보상후 약 0.99로 증가하였다. 그림 5의 b번 파형은 3상전류를 2상 벡터 변환했을 경우의 파형이다. 3상 정현파인 경우에는 원형으로 나타나지만 고조파의 영향으로 파형이 많

이 왜곡되어 있다. 보상후의 벡터변환 파형을 보면 고조파가 조금 포함되어있기는 하지만 보상전보다는 많이 개선되었음을 명확하게 알 수 있다.

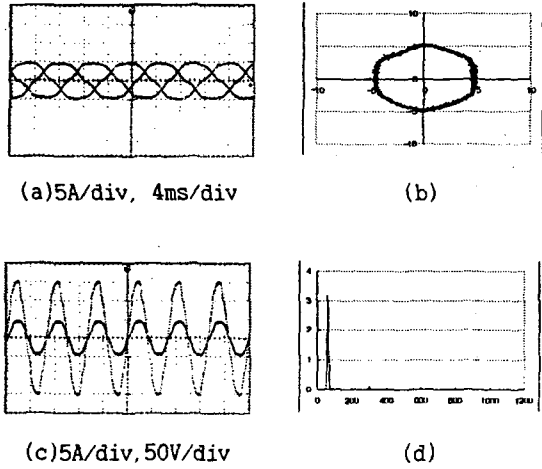


그림 5. 고조파 전압원에 대한 보상후 파형들
Fig 5. After compensation waveforms for harmonic voltage source

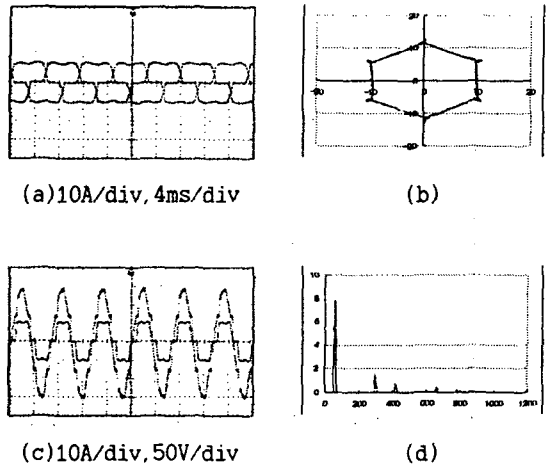


그림 6. 고조파 전류원에 대한 보상 전 파형들
Fig 6. Before compensation waveforms for harmonic current source

그림 6과 그림 7은 고조파 전류원에서의 보상전과 병렬수동필터와 직렬형 능동전력필터의 결합시스템을 사용하여 보상한 후의 파형들이다. THD는 보상전 18%, 병렬수동필터만 사용하여 보상한 경우는 약 5.2%, 병렬수동필터와 직렬능동필터의 결합시스템을 사용한 경우는 0.5%로 개선되었다. 그리고, 역율은 보상전 0.949, 병렬수동필터 결선시 전상 0.609, 결합시스템을 사용해서 보상한 경우에는 거의 1이 되었다. 그리고, 벡터변환파형도 거의 원형을 보이고 있다.

3. 결 론

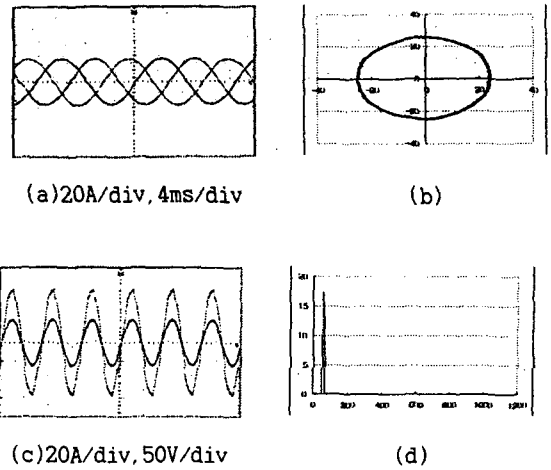


Fig 7. 고조파 전류원에 대한 보상후 파형들
Fig 7. After compensation waveforms for harmonic current source

본 논문에서는 3상 3선식 직렬형능동필터의 제어 알고리즘을 제시하였다. 보상기준전압과 부하 전압을 이용해서 성능함수를 정의하였고, 이 성능함수를 최소화하는 보상기준전압을 도출함으로써 전원단의 고조파를 최소화할 수 있음을 보였다. 또한, 제안된 알고리즘이 고조파 전압원뿐만 아니라 고조파 전류원 보상에도 효과적임을 알 수 있었다. 고조파 전압원과 고조파 전류원의 경우 모두 상전류의 THD가 5%미만인 우수한 보상결과를 얻을 수 있었고 무효전력보상을 실현하여 전원단 역율을 크게 개선할 수 있었다. 이러한 실험결과를 통해서 제안된 알고리즘의 유효성 및 우수성을 입증하였다.

참 고 문 헌

- [1] T. Furuhashi, et al. "A Study on the Theory of Instantaneous Reactive Power", IEEE Trans. on Industrial Electronics, Vol. 37, No. 1, Feb. 1990.
- [2] 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 Transactions on Industry Appl., Vol. 26, No. 6, pp. 983-990, 1990.
- [3] Qun Wang, et al. "Voltage Type Harmonic Source and Series Active Power Filter Adopting New Control Approach" The 25th Annual Conference of the IEEE, Vol. 2, pp. 843-848, 1999.
- [4] F.Z. Peng, "Application Issue of Active Power Filters", IEEE Industry application magazine, sept/oct 1998.