

성능함수제어 알고리즘을 이용한 3상 4선식 하이브리드형 직렬능동전력필터

김진선\* 신재화\*\* 김영석\*  
인하대학교\* 인천대학\*\*

Hybrid Series Active Power Filter Based on Performance Function Theory for 3-phase 4-wire System

Jin-Sun Kim\* Jae-Hwa Shin\*\* Young-Seok Kim\*  
Inha Univ.\*, Incheon College\*\*

**Abstract** - In this paper, the control algorithm and control method for a combined system of shunt passive filter and series active filter in 3-phase 4-wire system are discussed. Moreover, the 3-phase 4-wire system is widely employed in distributing electric energy to several office building and manufacturing plants. In such systems, the third harmonic and odd multiples of 3<sup>rd</sup> (9<sup>th</sup>, 15<sup>th</sup>, etc.) are termed as triple and zero sequence components that do not cancel each other in the system neutral. As a result, the triple harmonics add together creating a primary source of excessive neutral current. Regarding this concern, this paper presents a new control scheme for a series hybrid active system. This series active power filter acts not only as a harmonic compensator but also as a harmonic isolator. Hence the required rating of the series active filter is much smaller than that of a conventional shunt active filter. However, the performance of the combined system is greatly influenced by the filtering algorithm employed in the active power filter. This paper proposes a series active power filter scheme based on performance function. Some experiments was executed and experimental results from a prototype active power filter confirm the suitability of the proposed approach.

필터들이 연구되었다. 이러한 시스템은 고조파 보상효과가 교류 전력 시스템의 전원 임피던스에 의한 영향을 받지 않고, 능동필터가 수동 필터와 능동필터의 사이에 직렬로 위치하여 공진을 방지하고, 직렬형 능동 필터의 용량은 능동필터 단독운전보다 작게된다. 그러나, 하이브리드형 직렬필터의 성능은 능동필터에 적용되는 제어 알고리즘에 크게 좌우된다.[1] 특히, 최근에는 복사기, 형광등, 컴퓨터, 팩스, 에어컨 등, 고조파 전압원으로 동작하는 부하들이 빠르게 증가하고 있기 때문에 이와같은 고조파 전압원 형태의 부하에 대한 대책이 점점더 중요해지고 있다.

또한 고조파 전류원 보상에 적합한 병렬형 능동전력필터는 오래 전부터 많은 연구가 수행되어 성공적으로 개발되었고, 실제 산업현장에 적용되고 있다.[2] 그러나, 기존의 대표적인 3상 3선식 알고리즘인 Akagi의 순시 무효전력이론[3]이나, 동기 좌표계 이론[4]은 병렬형 능동필터를 기준으로 제안한 알고리즘으로 상업용이나 업무용 빌딩에 채택되는 3상 4선식 시스템에 대해서는 그 성능을 확실히 보장해줄 수가 없기 때문에 3상 4선식 시스템에 대한 새로운 알고리즘이 요구되고 있다.[5] 고조파나 부하 불평형 외에 업무용이나 상업용 빌딩등에 주로 채택되는 3상 4선식 배전 시스템에서는 비선형 부하의 증가에 따라 중성선 전류가 크게 증가하게 된다. 이러한 중성선 전류의 증가는 중성선 자체뿐만 아니라, 중성선에 연결된 변압기 등의 용량증대를 가져오게 되고 상 전압이 불안정해지는 주요한 요인이 되기 때문에 정밀한 전원이 요구되는 시스템의 오동작 원인이 되기도 한다.[6] 따라서, 3상 4선식 시스템에서는 고조파와 역률 개선뿐만 아니라, 중성선 전류를 제거하기 위한 알고리즘이 절실히 요구되고 있다.

1. 서 론

최근, 정보화와 산업화가 점점 더 고도화되면서 SMPS, UPS, 컴퓨터시스템 등 사이리스터나 다이오드 정류기와 같은 반도체 전력변환장치를 사용하는 부하들이 급증하고 있다. 이러한 부하들은 비선형 부하로 동작하여 전원측에 심각한 고조파를 발생시키는 중요한 원인이 된다.

이러한 문제를 해결하기 위하여, 수동 필터가 전통적으로 사용되어왔고 수동필터의 특성은 기본파에 대한 무효전력 보상이 가능하고, 구조가 간단하며, 고조파 제거에 효과적이며, 비용이 저렴하다. 그러나, 이러한 수동 필터는 몇가지 결점을 가지고 있는데, 전원 임피던스가 수동 필터의 보상 특성에 영향을 미치고 전원과 부하에 공진하기 쉬우며, 특정차수의 고조파에 동조하는 특성에 따라 여러 차수의 고조파를 보상하기 위하여 다수의 수동 필터를 설치해야 하므로 비용 및 설치공간에 제약이 발생하며, 수동필터의 성능은 시스템 임피던스에 영향을 받고 이 시스템 임피던스는 전력 시스템 정수에 따라 변화하므로 정확한 설계가 어려운 문제점등이 있다.

이러한 수동필터의 문제점을 개선하기 위하여 직렬형 능동필터와 수동필터를 결합한 하이브리드형 직렬능동

2. 본 론

2.1 3상 4선식 직렬형 능동필터에서의 보상원리

본 절에서 제안하는 알고리즘에서는 순시무효전력을 부하에서 발생하는 무효전력 대신에 능동전력필터에서 발생된 각 상의 전력을 순시 무효전력으로 정의한다. 이것은 능동전력필터가 순시 유효전력을 발생하지 않기 때문에 유효하다. 따라서 순시 무효전력  $q_k$ 는 다음 식(1)과 같이 나타낼 수 있다.

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

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

$$v_{ca} i_{sa} + v_{cb} i_{sb} + v_{cc} i_{sc} = 0 \quad (2)$$

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

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

3상 4선식 시스템인 경우는 부하전압과 상 전류에 영상이 존재할 수 있기 때문에 3상 4선식 직렬형 능동 전력필터에서는 부하전압에서 순시 유효전압을 발생하는 순시 유효전압벡터를 빼서 보상기준전압을 구해낸다. 순시 유효전압벡터  $V_p$  는 전원전류와 동상인 부하전압의 벡터 성분을 나타내고, 순시 무효전압벡터  $V_q$  는 순시 유효전압벡터  $V_p$  에 수직인 전압벡터 성분을 나타낸다. 여기에서, 순시 유효전압벡터를 다음 식 (4)에서와 같이 벡터의 놈에 의해서 구해낼 수 있다.

$$v_{x(a,b,c)} = \text{proj}_i; v_L = \frac{v_L \cdot i_S}{\|i_S\|^2} i_S$$

$$= \frac{v_{La} i_{Sa} + v_{Lb} i_{Sb} + v_{Lc} i_{Sc}}{i_{Sa}^2 + i_{Sb}^2 + i_{Sc}^2} i_{S(a,b,c)} \quad (4)$$

$$= \frac{p}{i_{Sa}^2 + i_{Sb}^2 + i_{Sc}^2} i_{S(a,b,c)}$$

$$v_{pa} = i_{Sa} \cdot p / (i_{Sa}^2 + i_{Sb}^2 + i_{Sc}^2)$$

$$v_{pb} = i_{Sb} \cdot p / (i_{Sa}^2 + i_{Sb}^2 + i_{Sc}^2) \quad (5)$$

$$v_{pc} = i_{Sc} \cdot p / (i_{Sa}^2 + i_{Sb}^2 + i_{Sc}^2)$$

$$v_{Ca} = v_{La} - i_{Sa} \cdot p / (i_{Sa}^2 + i_{Sb}^2 + i_{Sc}^2)$$

$$v_{Cb} = v_{Lb} - i_{Sb} \cdot p / (i_{Sa}^2 + i_{Sb}^2 + i_{Sc}^2) \quad (6)$$

$$v_{Cc} = v_{Lc} - i_{Sc} \cdot p / (i_{Sa}^2 + i_{Sb}^2 + i_{Sc}^2)$$

식 (3)의 성능함수는 식 (5)의 전압에서 최소가 되는데 이 보상기준전압은 앞서도 언급했듯이 부하전압에서 순시유효전압을 빼줌으로써 얻을 수 있다. 식 (5) 및 (6)의 순시유효전력  $p$ 는 다음 식 (7)과 같다.

$$p = v_{La} \cdot i_{Sa} + v_{Lb} \cdot i_{Sb} + v_{Lc} \cdot i_{Sc} \quad (7)$$

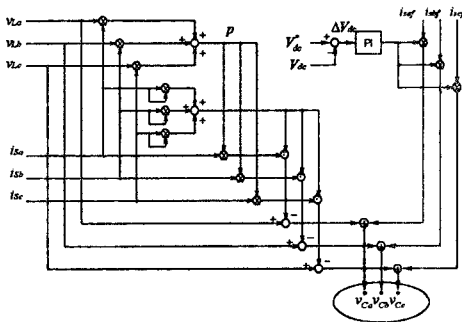


그림 2-1. 3상 4선식 직렬형 능동전력필터의 제어 알고리즘  
Fig 2-1. The control algorithm of 3-phase 4-wire series active power filter.

그림 2-1에 3상 4선식 직렬형 능동전력필터의 제어 회로를 나타내었다. 3상 부하전압과 3상 전원전류를 검출 회로를 통해서 받아와서 식 (6)에 의해 보상기준전압을 구하였고, 인버터 DC-link 전압제어를 위한 PI 제어기를 추가하여 최종적인 보상기준전압을 구해내었다.  $V_{dc}$  는 PT를 통해 받은 실제 인버터의 dc-link 전압이고,  $V_{dc}^*$  는 인버터 dc-link의 기준전압을 의미한다.

## 2. 2 시스템의 구성

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.

그림 2-5에 실험에 사용된 3상 4선식 R-L 부하 직렬형 능동전력필터의 회로도를 나타내었다.

RL 부하를 갖는 단상 다이오드 정류기 세 개를 써서 부하를 구성하였다. 그리고, 3상 전압원 인버터를 변압기를 써서 계통에 직렬로 결합하여 3kVA급의 3상 4선식 직렬형 능동전력필터를 구성하였다.

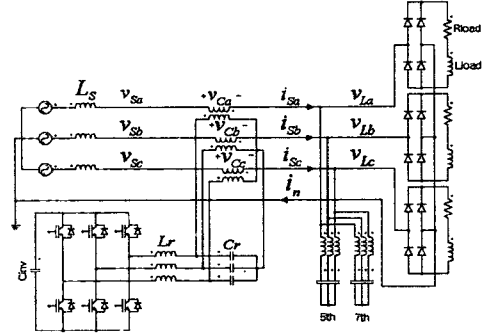
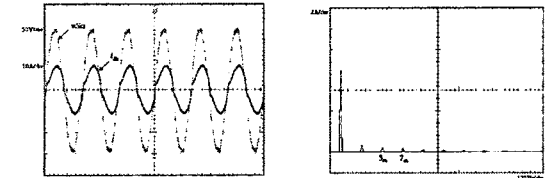


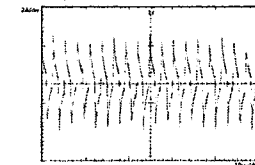
그림 2-2 3상 4선식 직렬형 능동전력필터 회로도  
Fig 2-2. 3-phase 4-wire series active power filter circuit

## 3 실험결과

그림 3-1은 고조파 전류원의 전원 전압, 전류 및 고조파 성분을 보여준다. 그림 3-1 (C) 그림은 부하 불평형 (인덕턴스)에 의하여 약간의 3차와 성분이 함유되어 있는 것을 알 수 있다.



(a) 전원 전압 및 전류 파형 (PF : 0.952)  
(b) 전류 스펙트럼 (THD : 10.4%)



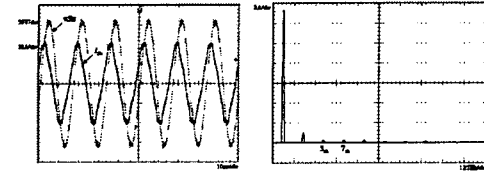
(c) 중성선 전류 파형 (2.26 [A])

그림 3-1 보상전 실험 파형

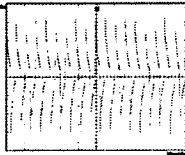
Fig 3-5. Experimental waveforms before compensation

그림 3-2에 수동필터로 5차 및 7차를 보상한 후의 파형을 나타내었다. 정류기 부하에서 많이 발생하는 5차 및 7차 고조파 성분을 제거하여 전류 파형은 많이 개선 (8.7%) 되었지만 IEEE std. 519에서 제한하는 고조파 제한조건 (5% 이하)에는 아직도 미흡하며, 수동필터의 커패시터에 의해 역률이 진상 0.652로 나빠짐을 알 수 있다. 이러한 진상 역률은 부하단의 전압을 높게 하여 절연에 악 영향을 미친다. 또한 중성선 전류의 보상도 거의 이루어지지 않고 있다. 그림 3-3에 수동필터와 능동필터로 보상 시 능동필터 시동 시의 과도 파형을 나타내고 있다. 전압 파형은 순시적으로 개선되나 전류는 지연이 발생하고, 급격한 역률의 변화로 위상 변동이 발생하는 것을 볼 수가 있다. 그림 3-4은 수동필터와 능

동 필터로 보상하여 안정된 상태에서의 실험 파형들을 보여주고 있다. 상전류의 THD는 보상전 약 10.4%에서 보상후 3.0%로 개선되었고, 역률 역시 보상전 0.95에서 보상후 약 1로 증가하였다. 3상 4선식 전원 시스템의 중성선 전류는 보상전 약 2.26[A]에서 보상 후 약 0.9[A]로 감소(2/5)하여 중성선 전류를 억제할 수 있음을 알 수 있다.

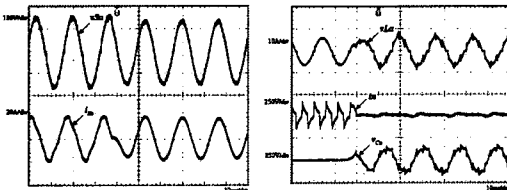


(a) 전원측 전압 및 전류 파형 ( PF : 0.652 lead ) (b) 전류 스펙트럼 (THD : 8.7%)



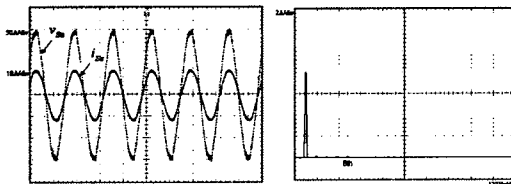
(c) 중성선 전류 파형 ( 2.26 [A] )

그림 3-2 수동필터 보상 후 실험 파형  
Fig 3-2. Experimental waveforms after compensation with passive filter

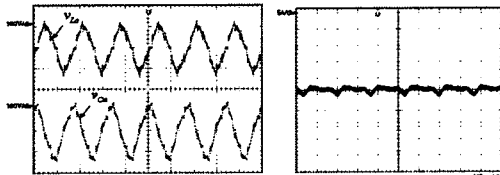


(a) A상 전원측 전압 및 전류 파형 (b) A상 부하측 전압, 중성선 전류 및 보상 전압 파형

그림 3-3 수동 및 능동필터 보상 시 파도 실험 파형  
Fig 3-3. Experimental waveforms during compensation with passive filter and active power filter

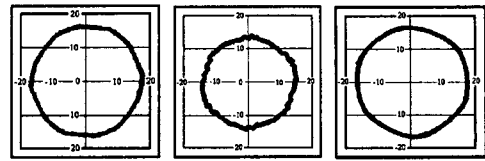


(a) A상 전원측 전압 및 전류 파형 ( PF : 0.992 ) (b) 전류 스펙트럼 (THD : 3.0%)



(c) 부하 전압 및 보상전압 파형 (d) 중성선 전류 파형

그림 3-4 수동 및 능동필터 보상 후 실험 파형  
Fig3-4 Experimental waveforms after compensation with the passive and active power filter



(a) 보상 전 (b) 수동필터 보상 (c) 수동필터 및 능동필터보상

그림 3-5. 고조파 전류원의 보상 전과 보상 후 3상 전류의 2상 벡터 변환 파형

Fig 3-5. Vector transformation waveforms of 3-phase currents before and after compensation

그림 3-5의 파형은 3상전류를 2상 벡터변환 했을 경우의 파형이다. 3상 정현파인 경우에는 원형으로 나타나지만 고조파의 영향으로 파형이 왜곡되어 있다. 수동 필터의 영향으로 고조파를 보상하는 성분보다 역률을 개선하는 역할이 주로 이루어 지고 있으며, 이는 적은 용량의 능동필터로 대용량의 전력 시스템에 적용 할 수 있음을 의미하므로 본 논문에서 제안하는 능동필터를 고조파 전류원 부하를 갖고있고 수동필터가 설치되어있는 전력시스템에 적용하면 경제적임을 추측 할 수 있다

### 3. 결 론

본 논문에서는 3상 4선식에 R-C 부하에 적용되는 하이브리드형 직렬형능동필터의 제어알고리즘을 제시하였다. 보상기준전압과 부하 전압을 이용해서 성능함수를 정의하였고, 이 성능함수를 최소화하는 보상기준전압을 도출함으로써 전원단의 고조파를 최소화할 수 있음을 보였다. 상전류의 THD가 5%미만인 우수한 보상결과를 얻을 수 있었고 무효전력보상을 실현하여 전원단 역률을 크게 개선할 수 있었다. 특히, 중성선 전류를 억제 하므로 중성전류가 시스템에 미치는 영향을 감소시킬 수 있다. 이러한 실험결과를 통해서 제안된 알고리즘의 유효성 및 우수성을 입증하였다.

### (참 고 문 헌)

- [1] 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 Applications, Vol. 26, No. 6, pp 983-990, 1990.
- [2] Mauricio Aredes, et al. "Three-Phase Four-Wire Shunt Active Filter Control Strategies" IEEE Transactions On Power Electronics, Vol. 12, No. 2, pp311-318, 1997, March
- [3] H. Akagi, et al. "Instantaneous Reactive Power Compensators Comprising Switching Devices without Energy Storage Components." IEEE Transactions On Industry Applications, Vol. IA-20, No. 3, pp625-630, May/June 1984.
- [4] S. Bhattacharya, et al. "Parallel Active Filter System Implementation and Design Issues for Utility Interface of Adjustable Speed Drive Systems", IAS '96, pp1032-1039, 1996.
- [5] F. Z. Peng, et al. "Harmonic and Reactive Power Compensation Based on the Generalized Instantaneous Reactive Power Theory for 3-Phase 4-Wire Systems" PESC '97 Record, 28th Annual IEEE, Vol. 2, pp 1089-1095, 1997.
- [6] Enjeti, P. et al "Analysis and design of a new active power filter to cancel neutral current harmonics in three phase four wire electric distribution systems" Industry Applications Society Annual Meeting, 1993., Conference Record of the 1993 IEEE , vol.2, pp. 939 -946, 2-8 Oct 1993.