

3상 4선식 전력시스템에서 직렬형 능동필터에 의한 고조파전류와 무효전력 보상에 관한 연구

김진선* 김영조** 김영석*
인하대학교* 유한대학**

The Harmonics and Reactive Power Compensation with Series Active Power Filter in 3-phase 4-wire System

Jin-Sun Kim* Young-Jo kim** Young-Seok Kim*
Inha Univ.* Yuhan College**

Abstract - In this paper, a new control strategy of a series active power filter using direct compensating voltage extraction method is proposed. This control algorithm compensates harmonics, reactive power and neutral line currents which are generated by balanced or unbalanced nonlinear loads. The advantage of this method is that the compensating voltage of the series active power filter can be extracted without phase transformation. Therefore, calculation time is shortened and the control method is simple compared with conventional method as the p-q theory. In addition, this control strategy was applied for the series active power filter in 3-phase 4-wire system which is widely employed in distributing electric energy to several office building and manufacturing plants. Some results obtained from the experimental model using the proposed method are presented to demonstrate and confirm its validity.

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 전자환경 적인 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 직렬 공진을 일으킬 가능성을 항상 내재하고 있다. 이러한 수동필터의 단점을 보완하기 위해 능동필터가 개발되었다. 능동전력필터에는 보상 전류를 주입해주는 병렬형과[3] 보상전압을 주입해주는 직렬형[6], 그리고 수동필터와 능동필터를 병용하는 방식등[5]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.[7] 따라서, 급속히 증가하고 있는 고조파 전압원에 대한 보상을 효과적으로 수행할 수 있는 직렬형 능동전력필터에 대한

중요성이 점점 증가하고 있다.

또한 고조파 전류원 보상에 적합한 병렬형 능동전력필터는 오래 전부터 많은 연구가 수행되어 성공적으로 개발되었고, 실제 산업현장에 적용되고 있다.[10] 그러나, 기존의 대표적인 3상 3선식 알고리즘인 Akagi의 순시 무효전력이론[11]이나, 동기좌표계 이론[12]은 병렬형 능동필터를 기준으로 제한한 알고리즘으로 상업용이나 업무용 빌딩에 채택되는 3상 4선식 시스템에 대해서는 그 성능을 확실히 보장해줄 수가 없기 때문에 3상 4선식 시스템에 대한 새로운 알고리즘이 요구되고 있다.[13] 특히, 3상 4선식 배전계통에서는 부하의 불평형이 발생할 수 있기 때문에 이러한 불평형 전류를 동시에 제거해줄 수 있는 알고리즘이 필요하게 된다.

고조파나 부하 불평형 외에 업무용이나 상업용 빌딩등에 주로 채택되는 3상 4선식 배전시스템에서는 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.[14] 따라서, 3상 4선식 시스템에서는 고조파와 역률 개선뿐만 아니라, 중성선 전류를 제거하기 위한 알고리즘이 절실히 요구되고 있다.

특히, 최근에는 복사기, 형광등, 컴퓨터, 팩스, 에어컨 등, 고조파 전압원으로 동작하는 부하들이 빠르게 증가하고 있기 때문에 이와같은 고조파 전압원 형태의 부하에 대한 대책이 점점 더 중요해지고 있다.

따라서, 본 논문에서는 고조파 전압원 부하를 가지는 3상 4선식 시스템에서 비선형 부하로부터 발생하는 고조파와 역률 저하를 보상하고, 상 전류의 약 1.5배에 이르는 중성선 전류를 효과적으로 제거하기 위한 직렬형 능동전력필터의 제어알고리즘을 제안하였다.

이 제어법은 상 변환 없이 보상기준전압을 직접 추출해 냄으로써 기존의 제어법보다 더 간단하고, DSP를 사용해서 보상기준전압을 연산해 내는 시간을 단축시킬 수 있기 때문에 무효전력의 실시간 제어에 더 근접할 수 있는 요건을 제공해 주어 능동필터의 성능개선에 기여하게 된다.

제안된 제어알고리즘의 유효성을 입증하기 위해서 고조파 전압원 부하와 고조파 전류원 부하를 구성하여 실험을 수행하였고, 실험결과를 제시하였다.

2. 본 론

2.1 3상 4선식 직렬형 능동필터에서의 보상원리

본 절에서 제안하는 알고리즘에서는 순시무효전력을 부하에서 발생하는 무효전력 대신에 능동전력필터에서 발생한 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.

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

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 영향분이 존재할 수 있기 때문에 3상 4선식 직렬형 능동전력필터에서는 부하전압에서 순시 유효전압을 발생하는 순시 유효전압벡터를 빼서 보상기준전압을 구해낸다. 그림 1에서도 볼 수 있듯이 순시 유효전압벡터 V_p 는 전원전류와 동상인 부하전압의 벡터 성분을 나타내고, 순시 무효전압벡터 V_q 는 순시 유효전압벡터 V_p 에 수직적인 전압벡터 성분을 나타낸다. 여기에서, 순시 유효전압벡터를 다음 식 (29)에서와 같이 벡터의 놈에 의해서 구해낼 수 있다.

$$\begin{aligned} v_{A(a,b,c)} &= \text{proj } i \cdot v_L = \frac{v_L \cdot i_S}{\|i_S\|^2} i_S \\ &= \frac{v_{La} i_{Sa} + v_{Lb} i_{Sb} + v_{Lc} i_{Sc}}{i_{Sa}^2 + i_{Sb}^2 + i_{Sc}^2} i_{S(a,b,c)} \\ &= \frac{p}{i_{Sa}^2 + i_{Sb}^2 + i_{Sc}^2} i_{S(a,b,c)} \end{aligned} \quad (4)$$

$$\begin{aligned} v_{pa} &= i_{Sa} \cdot p / (i_{Sa}^2 + i_{Sb}^2 + i_{Sc}^2) \\ v_{pb} &= i_{Sb} \cdot p / (i_{Sa}^2 + i_{Sb}^2 + i_{Sc}^2) \\ v_{pc} &= i_{Sc} \cdot p / (i_{Sa}^2 + i_{Sb}^2 + i_{Sc}^2) \\ v_{Ca} &= v_{La} - i_{Sa} \cdot p / (i_{Sa}^2 + i_{Sb}^2 + i_{Sc}^2) \\ v_{Cb} &= v_{Lb} - i_{Sb} \cdot p / (i_{Sa}^2 + i_{Sb}^2 + i_{Sc}^2) \\ v_{Cc} &= v_{Lc} - i_{Sc} \cdot p / (i_{Sa}^2 + i_{Sb}^2 + i_{Sc}^2) \end{aligned} \quad (5)$$

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

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

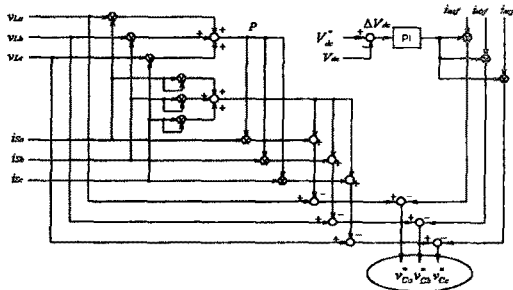


그림 2-1. 3상 4선식 직렬형 능동전력필터의 제어 알고리즘
Fig 2-1. The control algorithm of 3-phase 4-wire series active power filter.

그림 2-1에 3상 4선식 직렬형 능동전력필터의 제어회로를 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 받아온 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 2-2은 제어 알고리즘을 적용하기 위해 구성된 고조파 전압원에 대한 3상 4선식 직렬형 능동전력필터 회로도이다. 고조파 전압원은 그림 2-2에 나타난 것처럼 3상 다이오드 정류기의 부하단에 3개의 R-C 부하를 연결하여 구성하였다.

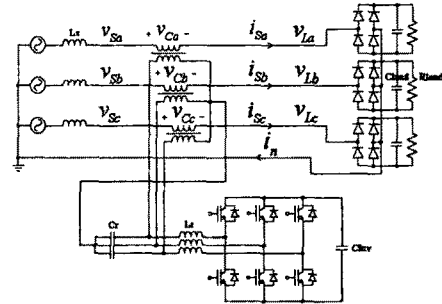
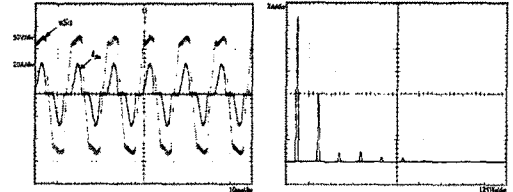


그림 2-2 3상 4선식 R-C 부하 직렬형 능동전력필터 회로도

Fig 2-2. 3-phase 4-wire series active power filter circuit for R-C loads

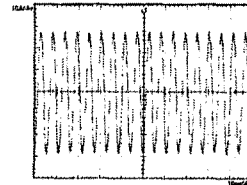
3 실험결과

그림 3-1, 3-2 및 3-3은 고조파 전압원에 대한 보상 전과 과도 및 보상후의 파형 들이다.



(a) 전원 전압 및 전류 파형 (PF : 0.814)

(b) 전류 스펙트럼 (THD : 48.21%)



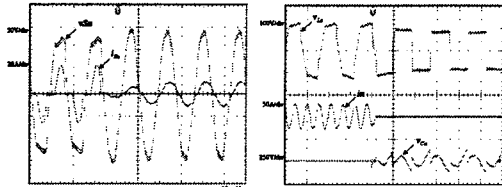
(c) 중성선 전류 파형 (19.9 [A])

그림 3-1 보상 전 실험 파형

Fig 3-1. Experimental waveforms before compensation

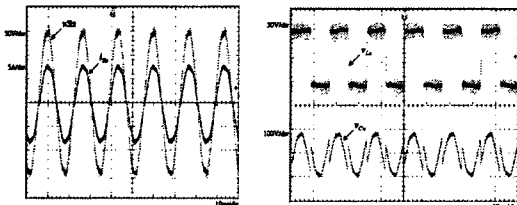
상전류의 THD는 보상 전 약 48%에서 보상 후 3.5%로 개선되었고, 역률 역시 보상 전 0.81에서 보상 후 약 0.99로 증가하였다. 능동필터 시동 시 전압의 파형은 순간적으로 보상되어진 파형으로 나타나지만 전류의 파형은 그림 3-2 과도현상에서 나타난 바와 같이 3-4 사이클 정도의 지연이 발견되었다. 그림 3-1 (c)

및 그림 3-3 (c)에서 알 수 있듯이 3상 4선식 전원 시스템의 중성선 전류는 보상 전 약 20[A]에서 보상 후 약 0.5[A]로 감소(1/40)하여 탁월한 중성선 전류 억제 효과를 알 수 있다. 그림 3-4의 파형은 3상전류를 2상 벡터 변환했을 경우의 파형이다. 3상 정현파인 경우에는 원형으로 나타나지만 고조파의 영향으로 파형이 많이 왜곡되어 있다. 보상후의 벡터변환 파형을 보면 고조파가 조금 포함되어있기는 하지만 보상 전보다는 많이 개선되었음을 명확하게 알 수 있다.

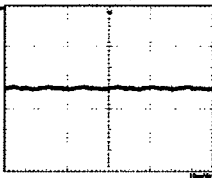


(a)전원 전압 및 전류 파형 (b) 부하 전압, 중성선 전류 및 보상전압 파형
그림 3-2 과도 시 실험 파형

Fig 3-2. Experimental waveforms during transition states

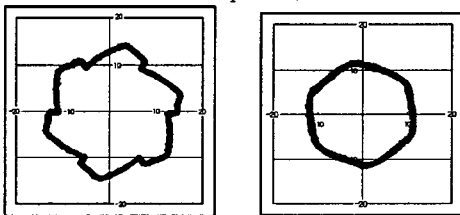


(a)전원 전압 및 전류 파형 (b) 부하 전압 및 보상전압 파형 (PF : 0.992)



(c) 중성선 전류 파형
그림 3-3 보상 후 실험 파형

Fig 3-3. Experimental waveforms after compensation



(a) 보상 전 파형 (b) 보상 후 파형
그림 3-4. 고조파 전압원의 보상 전과 보상 후 3상 전류의 2상 벡터 변환 파형

Fig 3-4. Vector transformation waveform of 3-phase currents before and after compensation

3. 결 론

본 논문에서는 3상 4선식에 적용되는 직렬형능동필터의 제어알고리즘을 제시하였다. 보상기준전압과 부하 전압을 이용해서 성능합수를 정의하였고, 이 성능합수를

최소화하는 보상기준전압을 도출함으로써 전원단의 고조파를 최소화할 수 있음을 보였다. 고조파 전압원과 고조파 전류원의 경우 모두 상전류의 THD가 5%미만인 우수한 보상결과를 얻을 수 있었고 무효전력보상을 실현하여 전원단 역을 크게 개선할 수 있었다. 특히, 중성선 전류를 억제 하므로서 중성전류가 시스템에 미치는 영향을 감소시킬 수 있다. 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, February, 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 Applications, 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
- [5] F. Z. Peng, Jih-Sheng Lai "Generalized Instantaneous Reactive Power Theory for Three Phase Power Systems", IEEE Trans. Instru. and Meas., vol. 45, No. 1, pp. 293 ~ 297, 1996
- [6] Zhaoan Wang, Qun Wang, "A Series Active Power Filter Adopting Hybrid Control Approach", IEEE Trans. on Power Electronics, vol. 16, no. 3, pp. 301 ~ 310, 2001
- [7] S. Bhattacharya, D. M. Divan and B. Banerjee, "Synchronous frame harmonic isolator using active series filter", EPE FRENZE Conf. Record, vol. 3, pp. 30 ~ 35, 1991
- [8] F. Z. Peng, H. Akagi and A. Nabae, "Compensation Characteristics of the Combined System of Shunt Passive and Series Active Filters", IEEE Trans. Ind. Appl., vol. 29, no. 1, pp. 144 ~ 152, 1993
- [9] 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.
- [10] 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
- [11] 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.
- [12] 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.
- [13] 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.
- [14] 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.