

### 3상 3선/4선식 전력계통의 고조파 저감을 위한 새로운 직렬형 능동 필터 시스템

김명현\*, 임승원\*, 한윤석\*, 김영석\*, 원충연\*\*, 최세완\*\*\*

\*인하대 전자·전기·컴퓨터 공학부, \*\*성균관대 전기공학과, \*\*\*서울산업대 제어계측공학과

#### A Novel Series Active Power Filter for Harmonic Reduction of 3-Phase 3-Wire/4-Wire System

Myounghyun Kim\*, Seungwon Lim\*, Yoonseok Han\*, Youngseok Kim\*, Chungyuen Won\*\*, Sewan Choi\*\*\*

\*School of Electrical and Computer Eng., Inha Univ.

\*\*Dept. of Electrical Eng. SungKyunkwan Univ.

\*\*\*Dept. of Control and Instrumentation Eng. Seoul National University of Technology

**Abstract** - This paper presents a new control algorithm for series active power filters that are applied to 3-phase 3-wire and 3-phase 4-wire systems with capacitive loads. It is difficult to reduce harmonic currents in neutral lines of the 3-phase 4-wire systems using conventional series active power filter control methods. 3-phase 4-wire series active power filter systems using the proposed method in this study lower neutral line harmonics. Simulation was carried out to verify the algorithm.

플레이션을 통하여, 본 논문에서 제안된 보상기법의 타당성을 입증하였다.

## 2. 본 론

### 2.1 보상원리

그림 1과 같은 3상4선 시스템에 대하여 상전압과 선전류는 다음과 같은 벡터로 나타낼 수 있다.

$$\text{순시전압벡터 } \mathbf{v} = [v_a \ v_b \ v_c]^t \quad (1)$$

$$\text{순시전류벡터 } \mathbf{i} = [i_a \ i_b \ i_c]^t \quad (2)$$

또한 순시 전압벡터  $\mathbf{v}$ 와 순시 전류벡터  $\mathbf{i}$ 는 3상2상 변환을 통하여 다음과 같이 쓸 수 있다.

$$\begin{aligned} \mathbf{v} &= [v_a \ v_b \ v_0]^t, \\ \mathbf{i} &= [i_a \ i_b \ i_0]^t \end{aligned} \quad (3)$$

여기서,

$$v_0 = \frac{1}{3}(v_a + v_b + v_c), \quad i_0 = \frac{1}{3}(i_a + i_b + i_c)$$

식 (3)의 순시 전압벡터  $\mathbf{v}$ 와 순시 전류벡터  $\mathbf{i}$ 를 이용하여 순시유효전력  $p$ 를 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$p = \mathbf{v}_{(\alpha, \beta, 0)} \cdot \mathbf{i}_{(\alpha, \beta, 0)} = v_a i_a + v_b i_b + v_0 i_0 \quad (4)$$

또한 순시무효전력 벡터  $\mathbf{q}$ 는 다음과 같이 유도된다.

$$\mathbf{q} = \mathbf{v}_{(\alpha, \beta, 0)} \times \mathbf{i}_{(\alpha, \beta, 0)} = \begin{bmatrix} q_\alpha \\ q_\beta \\ q_0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} v_\beta v_0 \\ i_\beta i_0 \\ v_0 v_a \\ i_0 i_a \\ v_a v_\beta \\ i_a i_\beta \end{bmatrix} \quad (5)$$

영상분 전압  $v_0$ 와 영상분 전류  $i_0$ 가 없는 3상3선식 시스템에서는 식 (5)를 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\mathbf{q} = \mathbf{v}_{(\alpha, \beta, 0)} \times \mathbf{i}_{(\alpha, \beta, 0)} = \begin{bmatrix} q_\alpha \\ q_\beta \\ q_0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ v_a v_\beta \\ i_a i_\beta \end{bmatrix} \quad (6)$$

## 1. 서 론

다이리스터 정류기 및 다이오드 정류기와 같은 비선형 부하로 구성되는 전력변환 기구들은 전력을 공급하는 AC 전원측에 심각한 고조파 성분을 발생시킨다. 따라서, 최근까지 이러한 비선형 부하에 의해 발생하는 입력 측 전류의 왜곡 문제를 해결하기 위한 연구가 오랜 기간 동안 행해져 왔다[1].

종래의 방식에 있어서는 이러한 문제들을 수동필터를 사용하여 해결해 왔지만 주로 인덕터와 커패시터로 구성되는 수동필터는 특정한 차수의 고조파 성분만을 제거할 수 있다는 단점을 지니고 있으므로 전력계통에 광범위한 차수의 고조파가 존재하는 경우에는 만족스러운 보상효과를 얻을 수 없다. 따라서, 이러한 수동필터의 단점을 보완하기 위해 능동전력필터에 관한 연구가 활발히 이루어지고 있다[2-4]. 능동전력필터는 크게 병렬형 능동전력필터와 직렬형 능동전력필터로 구분된다. 병렬형 능동전력필터의 경우 다이오드 정류기와 같은 용량성 부하에 적용하면 능동전력필터가 주입하는 전류가 부하측에도 흐르게 되어 고조파를 완전히 제거할 수 없음은 물론 다이오드 정류기에 흐르는 고조파 전류를 증대시켜 과전류를 초래할 위험이 있다. 이러한 현상을 방지하기 위해 교류측에 직렬리액터 삽입이 필요하나 이는 전압강하를 일으킬 뿐만 아니라 비경제적이다. 최근, 가전제품 및 사무기기의 보급확대에 따라 용량성 부하에 의한 고조파를 저감시키기 위하여 직렬형 능동 전력필터에 관한 연구가 행해져 왔다. 그러나 3상4선 배전 계통 시스템의 경우 기존의 직렬형 능동전력필터의 제어방법으로는 중성선에 흐르는 고조파를 제거할 수 없다.

본 논문에서는 용량성 부하에 대해 3상3선 시스템과 3상4선 시스템에 모두 적용할 수 있는 직렬형 능동전력필터의 새로운 제어법을 제안하였다. 본 연구에서는 3상 3선 전력계통의 고조파 저감과 함께, 3상4선 시스템 중성선 고조파를 제거하기 위한 새로운 직렬형 능동 전력필터 제어법을 소개하였다. 제안된 시스템에서는 부하측에 콘덴서 입력형 다이오드를 사용하였고, 능동 전력필터로는 3상 풀 브릿지 인버터를 적용하였다. 컴퓨터 시

식 (6)은 pq이론에서 정의된 무효전력값과 같은 값을 갖는다.[5]

식 (5)과 (6)로부터 다음과 같은 식을 구할 수 있다.

$$v_p(\alpha, \beta, 0) = \frac{p}{i(\alpha, \beta, 0) \cdot i(\alpha, \beta, 0)} i(\alpha, \beta, 0) \quad (7)$$

$$v_q(\alpha, \beta, 0) = \frac{q(\alpha, \beta, 0) \times i(\alpha, \beta, 0)}{i(\alpha, \beta, 0) \cdot i(\alpha, \beta, 0)} \quad (8)$$

식 (7)과 (8)의 전압성분은 다음과 같은 보상전압 지령치로 유도할 수 있다.

$$v^*_{c(\alpha, \beta, 0)} = \frac{\tilde{p}}{i(\alpha, \beta, 0) \cdot i(\alpha, \beta, 0)} i(\alpha, \beta, 0) + \frac{\tilde{q}(\alpha, \beta, 0) \times i(\alpha, \beta, 0)}{i(\alpha, \beta, 0) \cdot i(\alpha, \beta, 0)} \quad (9)$$

여기서,

$\tilde{p}$ 는 순시 유효전력의 맥동성분이며,  $\tilde{q}$ 는 순시 무효전력의 맥동성분이다.

식 (9)에 의해서 유도된 보상전압에 의해, 부하단에서 발생한 고조파전류가 전원단으로 유입되는 것을 차단하고, 중성선에 흐르는 고조파 전류 또한 "0"에 가깝게 저감된다.

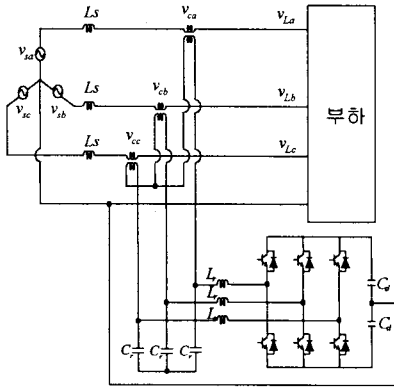


그림 1 제안된 시스템의 구성도  
Fig.1 Configuration of the proposed system

## 2.2 시스템 구성 및 시뮬레이션

직렬형 능동전력필터는 3상 풀 브릿지 인버터로 구성되어 있으며 출력단에는 인버터에서 발생하는 스위칭 리플을 저감시키기 위해 인덕터와 캐패시터가 연결되어 있다. 3상4선 시스템에서는 중성선을 인버터의 DC 링크 단 중성점에 연결함으로써 3상 풀 브릿지 인버터가 3개의 단상 인버터 역할을 할 수 있도록 하였다. 시뮬레이션에서는, 전원전압 ( $V_s$ )은 220 [V], 전원주파수 ( $f$ )는 60 [Hz]이다. 그리고 인버터와 전력계통시스템은 권수비가 1:1인 변압기를 사용하여 연결하였다. 부하는 콘덴서 입력형 다이오드 정류기를 사용하였으며, 이때 저항 ( $R_f$ )은 5[Ω]이고, 커패시턴스 ( $C_f$ )는 4700[μF]이다.

### 2.2.1 3상 3선 시스템

그림 2는 3상3선 시스템에서 제안된 방법의 시뮬레이션 결과로 부하가 3상 풀 브릿지 다이오드 정류기 일 때 (a)는 각 상의 전원전류, (b)는 a상의 주파수 특성

을 보기 위한 FFT결과이다. 그림으로부터 전원전류에 왜형이 거의 없는 것을 볼 수 있으며, 주파수 특성결과로부터 기본파에 대하여 고차 고조파는 1.6%, 7차 고조파는 0.88%이고 THD가 1.8%인 것을 확인하였다. 이로부터 고조파 저감에 대해 양호한 성능을 나타내는 것을 확인할 수 있다. 또한 3의 배수조파 성분이 나타나지 않는 것을 볼 수 있다.

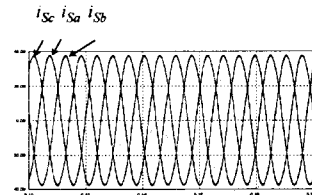
### 2.2.2 3상 4선 시스템

#### A. 전원 및 부하 평형시

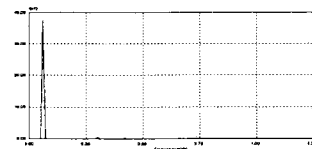
그림 3은 3상4선 시스템에서 제안된 방법의 시뮬레이션 결과로 3상3선 일 때와 달리 부하는 단상 다이오드 브릿지 3개를 사용하였으며, 전원전압과 부하를 대칭으로 하였다. 그림3의 (a)는 각 상의 전원전류, (b)는 a상의 주파수 특성을 보기 위한 FFT결과, (c)는 중성선 전류이다. 그림으로부터 전원전류에 왜형이 거의 없는 것을 볼 수 있으며, 주파수 특성결과로부터 THD가 2.5%로 고조파 저감에 대해 양호한 성능을 나타내는 것을 확인할 수 있다. 또한 3상4선 시스템이지만 전원전압과 부하가 대칭이므로 3의 배수조파 성분이 나타나지 않는 것을 볼 수 있다

#### B. 전원 및 부하 불평형시

그림 4는 시스템에 영상분이 나타나도록 c상 전원전압의 크기를 70%, a상 부하 출력단 저항값을 50%로 하였을 때의 시뮬레이션 결과이다. 그림 4의 (a)는 각 상의 전원전류, (b)는 중성선 전류, (c)는 a상, b상, c상의 주파수 특성을 보기 위한 FFT결과, 이다. 전원전압과 부하의 불평형에 의하여 전원전류의 크기는 평형이 아니지만 고조파 성분이 거의 없는 것을 볼 수 있다. a상의 경우 THD는 1.87%이다. b상의 경우 THD는 2.88%이다. c상의 경우 THD는 2.83%이다. 3조파 성분이 존재하나 그 크기는 매우 작고 THD도 작음을 확인할 수 있다. 위의 결과로부터 제안된 방법은 전원전압과 부하 불평형에 대해서 양호한 고조파 보상 특성을 가지며, 3상3선식과 3상4선식 전력계통 모두에 적용할 수 있음을 확인할 수 있다.

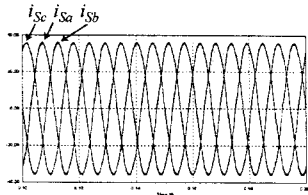


(a) 전원전류  
(a) Source currents

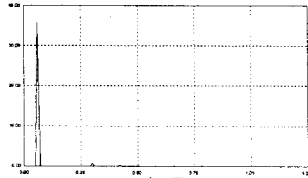


(b) a상 주파수 특성  
(b) Frequency characteristics of a phase

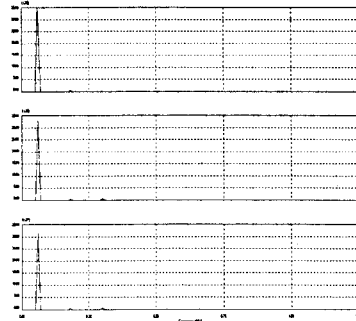
그림 2 3상3선 시스템에 대한 보상특성  
Fig. 2 Compensation characteristics of a 3-phase 3-wire system



(a) 전원전류  
(a) Source currents



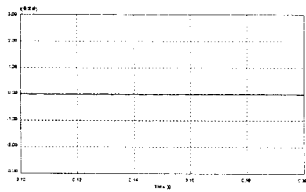
(b) a상 주파수 특성  
(b) Frequency characteristics of a phase



(c) 각상 주파수 특성  
(c) Frequency characteristics of each phases

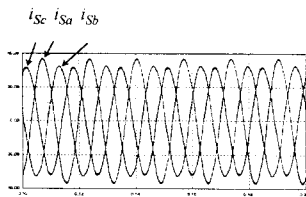
그림 4 3상4선 시스템에서 전원전압 및 부하 불평형에 대한 보상특성

Fig. 4 Compensation characteristics of a 3-phase 4-wire system with unbalanced source voltage and load

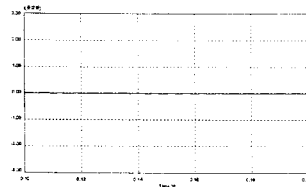


(c) 중성선 전류  
(c) neutral currents

Fig. 3 3상4선 시스템에 대한 보상특성  
Fig. 3 Compensation characteristics of a 3-phase 4-wire system



(a) 전원전류  
(a) Source currents



(b) 중성선 전류  
(b) neutral currents

### 3. 결 론

본 논문에서는 3상3선 및 3상4선 시스템에 모두 적용할 수 있는 직렬형 능동전력필터를 제안하였다. 이에 대한 시뮬레이션 결과를 요약하면 다음과 같다.

- 1) 제안된 능동전력필터는 용량성 부하에 대하여 양호한 고조파 저감특성을 갖는다.
- 2) 3상3선/4선 시스템 모두에서 양호한 고조파 저감 특성 갖는다.
- 3) 전원전압이나 부하의 불평형이 발생하더라도 전원전류에 고조파가 거의 발생하지 않을 뿐만 아니라, 중성선에도 고조파 전류가 거의 흐르지 않는다.

### [참 고 문 헌]

- [1] L. Gyugyi, E.C. Strycula, "Active ac Power Filter." Proc. IEEE IAS Annual Meeting, pp.529-533, 1976.
- [2] F. Z. Peng, G. W. Ott, D. J. Adams, "Harmonic and Reactive Compensation Based on the Generalized Instantaneous Reactive Power Theory for 3-Phase 4-Wire System." IEEE Trans. on Power Electronics, vol.13 no.6, pp.1174-1181, 1998.
- [3] 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
- [4] H. Akagi, "New Trends in Active Filters for Power Conditioning." IEEE Trans. on Industry Applications, vol.32 no.6, pp.1312-1322, 1996.
- [5] H. Akagi, Y. Kanazawa, and A. Nabae, "Instantaneous reactive power compensators comprising switching devices without energy storage components." IEEE Trans. on Industry Applications, vol.20, no.3, pp.625-630, 1984.