# 3상 4선식 배전계통에서 중성선 전류 고조파의 제거를 위한 능동전력필터의 새로운 제어기술

최세완 · 장민수 · 김태훈 · 김기용
서울산업대학교 제어계측공학과

# New Control Technique of Active Power Filter to Cancel Neutral Current Harmonics in Three-Phase Four-Wire Electric Distribution Systems

Sewan Choi Minsoo Jang Taehoon Kim Kiyong Kim
Dept. of Control and Instrumentation Eng. Seoul National University of Technology

**Abstract** - 최근 스위칭 전원장치를 사용하는 PC, UPS, 정류기 및 조명기기등 비선형부하의 증가에 따라 3상 4선식 배전계통에서 평형부하인 경우에도 중성선에 큰 고조파전류가 흘러 계통내 많은 문제를 야기하고 있다. 본 논문에서는 단상인버터에 의한 중성선전류 제어기술 [6]로서 불평형하에서 기본파의 영상전류에 의해 필터장치에 과부하가 걸리는 것을 방지하기위한 새로운 제어기법을 제안하고 이론에 의한 분석과 모의실험 및 실험에 의하여 타당성을 입증한다.

## 1. 서 론

현재 국내의 저전압 배전계통은 주로 220V/380V 또는 120V/208V의 3상 4선식이 사용되고 있다. 평형(Balanced) 이고 선형(Linear)인 부하에 대하여 각 상전류의 합인 중성선 전류는 이상적으로 0이며 일반적으로 약간의 불평형 조건에서도 상전류의 20%를 초과하지 않는다. 최근 스위칭 전원장치를 사용하는 PC, UPS, 정류기기 및 형광등의 조명장치등 비선형(Nonlinear)부하의 증가에 따라 각 상전류는 비정현파(Non-sinusoidal)로 되어 평형부하인 경우에도 3차, 9차, 15차, 21차등의 3조파(Triplen Harmonics)의 중성선 전류는 현저하게 흐르게 된다. 이러한 중선선 전류의 크기는 비선형의 정도에 따라 다르며, 최악의 경우 중성선 전류의 실효값은 상전류의 실효값의 173%가 된다[1]. 현재 국내에서 보고된 자료는 없지만 1990년에 미국에서 조사된 바에 의하면 컴퓨터 부하를 사용하는 미국전역의 146개 장소 중에서 22.6%인 33개 장소에서 중성선 전류가 상전류의 100%를 초과한다고 보고되었는데[2] 현재 그 비중은 이를 훨씬 초과한다고 볼 수 있다. 더욱이, 최근의 경향을 보면 컴퓨터의 소형화로 인하여 용량이 큰 3상 전원장치보다 각상과 중성선 사이에 연결되는 저용량의 단상 전원장치의 사용이 증가하고 있으며, 선형 전원장치(Linear Power Supplies)보다 효율과 가격측면에서 우수한 스위칭 전원장치(Switch Mode Power Supplies)의 사용이 증가하고 있는 추세에 있어서 중성선 고조파전류의 문제가 더욱 심각해지고 있다. 이러한 과도한 중성선 전류는 다음 표 I 과 같은 문제를 일으킬 수 있다. 이러한 중성선 전류를 저감하기 위한 기존의 방식중 LC 필터 [3]는 계통소자의 영향을 받기 쉬워 오히려 고조파가 증폭되는 문제가 있으며, 지그재그 필터 [4]는 전원 임피던스등 회로정수에 성능이 좌우되어 일반적으로 중성선 전류 제거율이 50%를 넘지 않는다. 또한 3상 4선식 능동전력필터 [5]는 계통임피던스에 의한 영향을 거의 받지 않으며 순시보상 특성등의 성능면에서 우수하나, 제어가 복잡하고 많은 수의 스위칭 소자들이 필요하여 부하용량대비 능동전력필터의 VA용량이 커서 장치의 가격이 높아 상품화가 어렵다. 단상인버터에 의한 중성선 전류제거방식 [6]은 제어가 간단하고, 스위칭 소자의 수가 적어 필터장치의 가격이 낮다. 그러나, 이 방식은 불평형 조건하에서 기본파의 영상성분이 단상인버터 쪽으로 유입되어 필터장치에 과부하가 걸릴 수 있다. 본 논문은 문헌[6]에서 제시한 제어방식을 개선하여 불평형시 필터장치의 과부하 현상을 억제함으로써 이 방식의 성능을 향상시키는데 그 목적이 있다.

표 I. 과도한 중선선 전류에 의한 문제

| 발생 장소 | 문제점 |
|---|---|
| 중성선 | 과전류에 의한 과열, 고장(Wiring Failure) 및 화재 |
| 변압기 | 과부하, 과열 및 절연파괴 |
| 차단기 및 계전기 | 빈번한 Tripping 및 오동작 |
| 계통내 소자 | 중성선 전류 과부하에 따른 소자의 Derating |
| 전자장비 및 계측기 | 중성점-접지점 전압강하로 인한 Common- Mode 노이즈에 의한 오동작 |
| 케이블 | 중성선의 과열로 동일 배선관내의 근접한 Phase Conductor의 과열 |
| 분전반 | 열 주기(Thermal Cycling)로 느슨하게 된 분전반 또는 연결점으로부터의 간헐적인 전기 노이즈 |

## 2. 본 론

### 2.1 기존 제어방식의 문제점

문헌 [6]에서 제안한 방식의 전력회로를 그림 1에 나타낸다. 이 필터장치는 배전반이나 중성선전류가 심각한 부하측에 설치하며 단상 PWM 인버터, Y-△형 변압기 및 다이오드 정류기로 구성된다. 이 방식의 가장 큰 장점은 연산이 간단하고 센서의 수도 적어 제어가 간단하고, 스위칭 소자의 수가 적어 필터장치의 가격이 낮다는 것이다. 그림 2(a)에 문헌[6]에서 제시한 제어블록도를 나타내는데 이는 전원측 중성선전류 $i_{ns}$의 지령치를 0(zero)으로 하여 단상 PWM 인버터를 동작시켜 부하에서 발생한 중성선전류 $i_{nL}$를 필터장치 쪽으로 유입시켜 전원측으로 가는 중성선전류 $i_{ns}$를 제거하는 방식으로 부하 변동 시에도 빠른 응답으로 발생하는 중성선전류를 제거할 수 있다. 또한, 부하조건에 따라 다르지만 전원측 입력전류의 3조파 성분도 제거되어 입력전류의 고조파 왜율(THD)을 낮춰주는 부가적인 기능이 있다. 그러나, 이 방식은 불평형 부하상태에서 기본파의 영상성분(Zero-Sequence Component)이 중성선에 발생할 경우 이 기본파 전류가 필터장치인 단상 인버터쪽으로 유입되어 3조파의 중성선 전류만을 고려해 설계된 필터장치에 과부하가 걸리거나 전원측 입력전류의 과보상으로 오히려 THD가 나빠질 우려가 있다. 먼저 기존제어방식의 분석과 시뮬레이션을 통하여 문제점을 알아보기로 한다. 60[Hz] Notch 필터의 전달함수 G(S)를 다음과 같이 가정한다.

$$G(s) = \frac{s^2 + \omega_0^2}{s^2 + \frac{\omega_0}{Q}s + \omega_0^2} \quad (1)$$

단, $\omega_0$는 전원의 각주파수, $Q$는 선택도임.

이때, 중성선고조파 전류의 보상특성은 부하측 중성선전류 $i_{nL}$에 대한 전원측 중성선전류 $i_{ns}$의 전달함수로 수식(2)와 같이 나타낼 수 있다.

그림 2(b)는 $P_{base}=P_o=15KVA$, $V_{base}=V_{LL}=220V$인 경우 선택도 $Q$에 따른 중성선전류 보상특성을 나타내는데 이는 선택도와 무관하게 통과대역폭이 너무작아 전원주파수($60Hz$)가 조금만 달라져도 불평형에 의한 기본파 성분 전류가 전원측으로 흐를 수 없음을 나타낸다. 그림 3은 부하 평형시와 불평형시 시뮬레이션 파형을 나타낸다. 부하평형시는 중성선에서 발생한 3조파전류가 거의 필터쪽으로 유입되어 전원측 중성선전류가 0(zero)에 가깝게 된다. 그러나, 부하불평형시 3조파뿐만 아니라 기본파의 영상성분도 필터쪽으로 유입되는 것을 알 수 있다. 이와 같이 인버터측으로 유입된 기본파 전류는 필터장치에 과부하를 걸리게 할 수 있다.

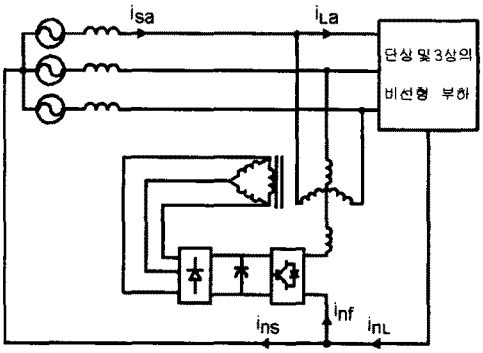
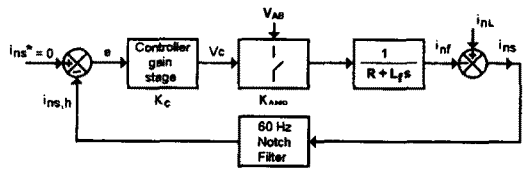
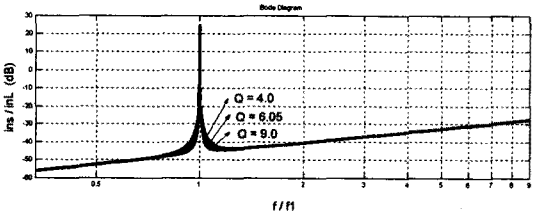



그림 1. 단상 인버터와 변압기를 조합하여 중성선 전류를 제거하는 방식 [6]

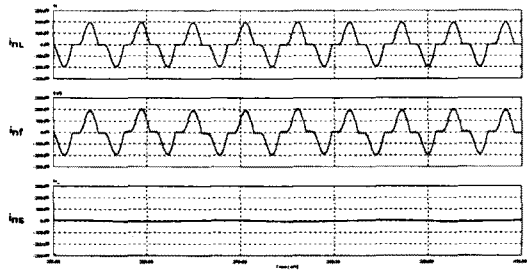



(a) 제어블록도[6]

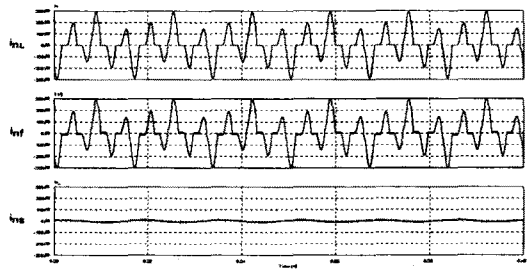



(b) 중성선 전류의 보상특성

그림 2. 기존방식의 제어블럭도와 보상특성




(a) 부하평형시




(b) 부하불평형시

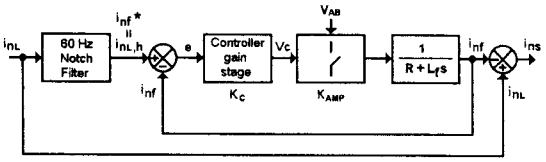
그림 3. 기존방식의 시뮬레이션

## 2.2 제안한 제어방식

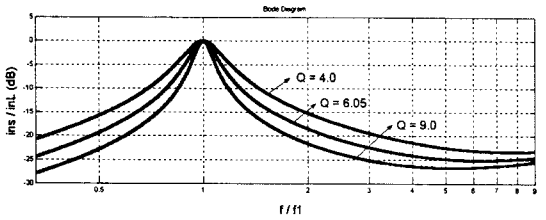
그림 4(a)는 불평형시 3조파등 고조파전류는 필터쪽으로 흐르게하고 기본파의 영상성분은 전원측으로 흐르게하기위하여 제안한 제어방식의 블록도 이다. 부하측 중성선전류 $i_{nL}$를 검출하여 Notch Filter로 기본파성분을 제거한 전류 $i_{nL,h}$를 단상인버터의 지령전류 $i_{nf}^*$로 하여 인버터를 동작시킴으로서 중성선의 고조파전류를 부하쪽으로 순환시킴과 동시에 부하측 중성선전류에 함유된 불평형에의한 기본파의 영상전류가 필터장치쪽으로 유입되는 것을 막아준다.식(1)의 60Hz Notch Filter를 사용한다고 가정하면, 부하측 중성선전류 $i_{nL}$에 대한 전원측 중성선전류 $i_{ns}$의 전달함수는 식(3)과 같이 된다. Notch Filter의 선택도 $Q$에 따른 제안한 방식의 중성선전류 보상특성을 그림 4(b)에 나타내는데, 선택도에 따른 통과 대역폭이 적절히 변화되고 있음을 보여준다. 그림 5는 제안한 방식의 시뮬레이션 파형을 나타내는데, 부하평형시는 기존의 방식과 동일하게 중성선전류가 필터쪽으로 흘러 전원측 중성선전류가 0(zero)에 가깝게 되며 부하불평형시는 기본파성분을 제외한 고조파성분만이 인버터쪽으로 흐르고 전원측 중성선에는 기본파 성분이 흐르는 것을 알 수 있다. 그림 6에 $220V$, $3KVA$급 Prototype으로부터 제안한 방식의 실험결과를 각부 전류파형으로 나타낸다. 제안한 방식의 실험결과는 부하평형시 뿐만 아니라 부하불평형 역시 분석 및 그림 5의 시뮬레이션 결과와 일치함을 알 수 있다.

$$\frac{i_{ns}}{i_{nL}} = \frac{s^3 + \left(\frac{R}{L_f}+\frac{\omega_0}{Q}\right)s^2 + \left(\frac{R}{L_f}\frac{\omega_0}{Q}+\omega_0^2\right)s + \frac{R}{L_f}\omega_0^2}{s^3 + \left(\frac{R}{L_f}+\frac{\omega_0}{Q}-\frac{K_C\cdot K_{AMP}}{L_f}\right)s^2 + \left(\frac{1}{L_f}\frac{\omega_0}{Q}+\omega_0^2\right)s + \left(\frac{R}{L_f}-\frac{K_C\cdot K_{AMP}}{L_f}\right)\omega_0^2} \tag{2}$$

$$\frac{i_{ns}}{i_{nL}} = \frac{s^3 + \frac{R}{L_f}s^2 + \left(\frac{R}{L_f}\frac{\omega_0}{Q}+\frac{K_C\cdot K_{AMP}}{L_f}\frac{\omega_0}{Q}+\omega_0^2\right)s + \frac{R}{L_f}\omega_0^2}{s^3 + \left(\frac{R}{L_f}+\frac{K_C\cdot K_{AMP}}{L_f}\right)s^2 + \left(\frac{R}{L_f}\frac{\omega_0}{Q}+\frac{K_C\cdot K_{AMP}}{L_f}\frac{\omega_0}{Q}+\omega_0^2\right)s + \left(\frac{R}{L_f}+\frac{K_C\cdot K_{AMP}}{L_f}\right)\omega_0^2} \tag{3}$$

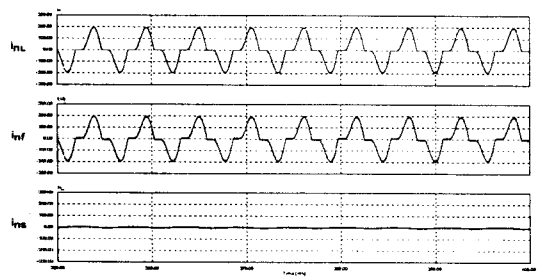



(a) 제어블록도

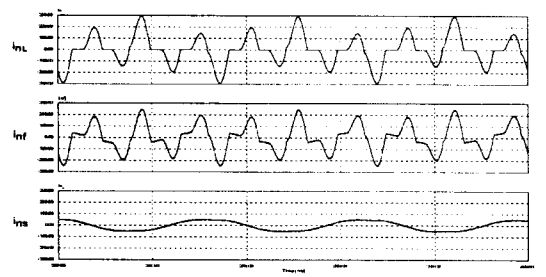



(b) 중성선전류의 보상특성

그림 4. 제안한방식의 제어블럭도와 중성선 중성선전류의 보상특성

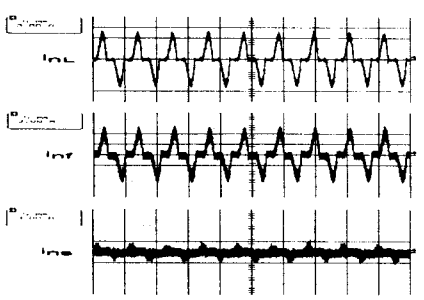


(a) 부하평형시

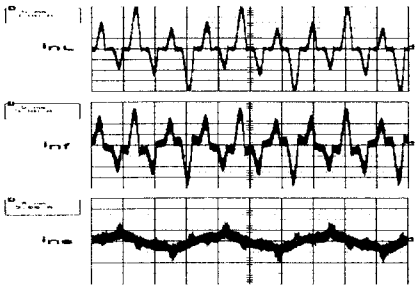


(b) 부하불평형시

그림 5. 제안한방식의 시뮬레이션



(a) 부하평형시



(b) 부하불평형시

그림 6. 제안한 방식의 실험파형

## 3. 결 론

본 논문에서는 3상 4선식 배전계통에서 중성선전류를 제거하기 위한 방식[6]의 제어방식을 개선하였다. 제안한방식은 부하평형시나 불평형시에도 인버터쪽으로 고조파전류만이 유입되므로 필터장치의 과부하를 막을수 있으며, 단상 및 3상의 비선형부하를 사용하는 곳에서 중성선 고조파전류의 제거는 물론 각상 입력전류의 THD 또한 개선할수 있다.

### [참 고 문 헌]

[1] T. M. Gruzs, "Power System Problems from High Harmonic Neutral Current," Comput. Technol. Rev., Winter 1988.

[2] T. M. Gruzs, "A Survey of Neutral Current in Three-Phase Computer Power System," IEEE Trans. on Ind. Appl. vol. 26, no. 4, Jul/Aug. 1990, pp. 719-725.

[3] Thomas Key, Jih-Sheng Lai, "Analysis of Harmonic Mitigation Methode for Building Wiring system," IEEE Trans. on Power System, vol. 13, no. 3, Aug. 1998, pp. 890-897.

[4] Prem P. Khera, "Application of Zigzag Transformers for Reducing Harmonics in the Neutral Conductor of Low Voltage Distribution System," in IEEE IAS Conf. Rec, 1990.

[5] C. A. Quinn, N.Mohan, "Active Filtering of Harmonic Currents in Three-Phase, Four-Wire Systems with Three-Phase and Single-Phase Non-Linear Loads," in APEC 1992, pp. 829-835.

[6] P. N. Enjeti, W. Shiren, "Analysis and Design of a New Active Power Filter to Cancel Neutral Current Harmonics in Three-Phase Four-Wire Electric Distribution Systems," IEEE Trans. Ind. Appl., vol. 30, no. 6, Nov./Dec. 1994, pp. 1565-1572.