

3상 4선식 배전계통에서 중성선 전류 제거를 위한 새로운 저가형 능동전력필터

張敏洙, 崔世琬*, 金基勇

A New Low-Cost Active Power Filter to Suppress Neutral Current Harmonics in Three-Phase Four-Wire System

Min-soo Jang, Se-wan Choi, and Ki-yong Kim

요 약

최근 상업용 빌딩, 주거용 빌딩 및 공장등의 저전압 3상 4선식 배전계통에서 PC, UPS, 정류기기, 조명장치 및 사무용기기등 비선형 부하의 사용이 증가하고 있으며, 이로 인한 과도한 중성선 전류는 중성선의 고장, 변압기의 과열 및 중성선과 접지사이의 전압강하등 심각한 문제를 야기시키고 있다

본 논문에서는 3상 4선식 배전계통에서 중성선 전류 제거를 위한 새로운 저감된 용량의 능동전력필터를 제안한다. 제안한 방식은 제어가 간단하고 불평형에 기인하는 기본파 전류만이 인버터 스위치로 흐를 수 있기 때문에 인버터의 VA 정격이 작아진다. 제안한 시스템은 실험에 의하여 그 타당성을 입증한다

ABSTRACT

Three-phase four-wire electrical distribution systems have been widely employed in manufacturing plants, commercial and residential buildings. Due to the nonlinear loads, the neutral conductor carries excessive harmonic currents resulting in wiring failure of the neutral conductor, overloading of the distribution transformer and a voltage drop between the neutral and the ground.

This paper proposes a reduced rating active power filter to suppress neutral current harmonics in three-phase four-wire electrical distribution systems. The proposed system is simple in control and the VA rating of the inverter could be significantly reduced since only the fundamental current due to unbalanced loading flows through the inverter switch. The experimental results on a prototype validate the proposed control approach.

Key Words : Three-phase four-wire, Active filter, Neutral current, Harmonics

1. 서 론

상업용 빌딩, 주거용 빌딩 및 공장등의 저전압 3상 4선식 배전계통에 사용되는 부하들은 주로 PC, UPS, 정류기기, 조명장치 및 사무용기기 등 거의 비선형(nonlinear) 부하이다. 이들 비선형부하의 사용으로 각 상전류는 비정현파(nonsinusoidal)로 되어 평형부하인 경우에도 3차, 9차, 15차, 21차 등의 3조파(tripplen harmonics) 중성선 전류가 현저하게 흐르게 되며, 최악의 경우 상전류의 1/3배가 된다. 최근, 산업의 발달

*서울산업대 제어계측공학과 조교수
E-mail : schoi@snut.ac.kr
접수일자 2002. 6. 8
1차심사 요청일 2002. 6. 10
심사완료일 2002. 7. 20

로 비선형 부하는 점점 증가하는 추세에 있으며 이로 인한 과도한 중성선 전류는 중성선의 고장, 변압기의 과열 및 중성선과 접지사이의 전압강하등 심각한 문제를 야기시키며 계통에 일으킬 수 있는 문제는 표 1과 같다^[1].

이러한 중성선 전류를 감소시키기 위한 방식이 제안되었는데^[2-5], 이들 중 현재 상품화가 완료된 방식으로서는 각 상과 중성선에 zigzag 변압기를 연결하는 방식^[2]은 영상성분(zero-sequence component) 임피던스가 작게 되도록 zigzag 변압기를 설계하여 부하에서 발생한 3조파의 영상성분 전류를 zigzag 변압기로 순환시켜 전원측으로 흐르는 중성선의 고조파전류를 제거한다. 그러나, 이 방식은 중성선전류 제거율이 시스템 임피던스에 영향을 받으며 영상성분에 대한 임피던스를 작게 하도록 하기 위하여 변압기의 크기가 커지는 문제가 있다. 또한 3상 4선식 능동전력필터^[3]는 계통임피던스에 의한 영향을 거의 받지 않으며 중성선전류 뿐만 아니라 각상전류의 고조파까지 총체적으로 보상할 수 있는 방식으로 순시보상 특성 등의 성능 면에서 우수하나, 제어가 복잡하고 부하용량대비 능동전력필터의 용량이 크기 때문에 가격이 높아 일부 중요한 부하에만 제한적으로 적용되고 있는 실정이다.

이러한 두가지 방식의 문제점을 보완할 수 있는 중성선 전류 고조파 제거용 능동전력필터가 제안되었다^[4]. 문헌 [4]에 제안된 방식은 zigzag 변압기를 사용한

수동방식^[2]과는 달리 변압기를 낮은 영상성분 임피던스를 갖도록 특별히 설계할 필요가 없으므로 변압기의 크기가 작아지며, 중성선전류 제거특성이 시스템 임피던스에 영향을 받지 않아 90%이상의 높은 제거율을 갖는다. 또한 제어가 간단하고 단상 인버터와 Δ -Y 변압기만을 전력회로로 사용하기 때문에 저가격화할 수 있다. 이와 유사한 방식으로 중성선과 직렬로 단상 인버터만을 연결하여 중성선전류 고조파를 제거하고 배전 변압기의 과부하를 방지할 수 있는 방식도 제안되었는데^[5], 이 방식은 단상 인버터의 동작이 각상 기본파 전류크기에 영향을 주며 전류형 부하에서는 잘 동작하지 못한다.

본 논문에서는 3상 4선식 배전계통에서 중성선 고조파전류 저감을 위한 새로운 저가형 능동전력필터를 제안한다. 제안한 방식의 주회로는 중성선에 직렬로 연결되는 단상인버터와 각상과 중성선 사이에 연결되는 zigzag 변압기로 구성된다. 이 인버터에는 부하가 평형일때는 전류가 흐르지 않고, 부하가 불평형인 경우 이 불평형에 의한 기본파전류의 영상성분만이 흐르게 되며, 또한 인버터는 이러한 기본파전류만 보상하면 되므로 직류측 dc 전압이 작아도 된다. 따라서 평형인 경우에도 인버터 스위치에 중성선 전류가 흐르며 고조파를 인버터의 지령전류로 하는 문헌^[4]의 방식과 비교하여 인버터 스위치의 전압 및 전류정격이 현저히 작다. 본 논문에서는 제안한 방식의 기본 동작원리와 제어방식 및 스위칭소자의 정격동을 서술하고 실험을 통하여 본 방식의 타당성을 입증하고자 한다.

표 1 과도한 중성선 전류에 의한 문제

Table 1 Problem of excessive neutral current

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
진자장비 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. 제안한 방식의 능동전력필터

2.1 동작원리

그림 1은 제안하는 능동전력필터 시스템의 주전력회로이다. 중성선에 직렬로 단상 PWM 인버터가 연결되며 각상과 중성선 사이에는 zigzag 변압기가 연결된다. 인버터에 필요한 dc 전압은 zigzag 변압기의 중간탭으로부터 저용량의 다이오드 정류기를 통하여 얻는다. 인버터 출력측에 병렬로 연결된 스위치(bypass switch)는 인버터 고장시 동작한다.

제안한 주회로를 위한 제어 블록도는 그림 2와 같다. 부하측 중성선 전류 i_{nL} 를 60Hz 밴드패스필터로 고조파 성분을 제거하여 기본파 성분 $i_{nL,f}$ 이 검출되면 이것을 인버터의 지령전류 i_{ns}^* 로 하여 전류제어를 수행한다. 이때, 60Hz 밴드패스필터의 전달함수는 다음과 같다.

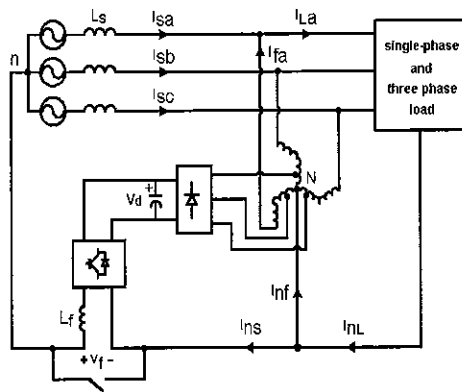


그림 1 제안한 능동전력필터 시스템
Fig 1 Proposed active power filter system

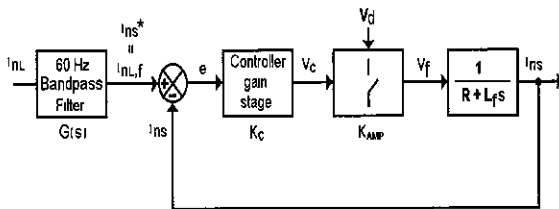


그림 2 페루프 제어 시스템의 블록도
Fig 2 Block diagram of the closed loop control system

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

여기서, ω_0 는 전원의 각주파수, Q 는 선택도임

전류검출기로부터의 실제 인버터 출력전류 i_{ns} 와 지령전류 i_{ns}^* 와의 오차신호는 보상기 $K_C(s)$ 를 거친후 인버터 스위치의 PWM 동작을 위해 삼각파 캐리어 신호와 비교되어진다. 삼각파 신호의 최대값을 A_T , 인버터 dc 전압을 V_d 라고 가정했을 때 스위칭 블록 K_{AMP} 의 이득은 다음과 같이 표현된다

$$K_{AMP} = \frac{V_d}{A_T} \quad (2)$$

인덕터 L_f 는 인버터의 PWM 동작에 의해 발생하는 스위칭 리플을 제한하도록 설계된다. 그림 2로부터 부하측 중성선 전류 i_{nL} 과 전원측 중성선 전류 i_{nS} 사이의 페루프 전달함수는 식 (3)과 같이 된다

그림 3은 밴드패스 필터의 선택도가 각각 $Q=4.0$, $Q=6.05$, 그리고 $Q=9.0$ 일 때 능동전력필터의 보상특성을 나타낸다. 선택도 Q 와는 거의 무관하게 부하가 불평형일때 발생하는 기본과 성분만이 전원측으로 흐를 수 있다는 것을 알 수 있다. 또한, 부하측 고조파 전류는 모두 zigzag 변압기를 통해 부하측으로 순환하여 흐름과 동시에 입력전류에서 이러한 영상성분의 고조파를 상쇄시키는 효과를 갖는다. 이와같이 인버터에서는 부하가 평형일때는 전류가 흐르지 않을 뿐아니라, 부하가 불평형인 경우 이 불평형에 의한 기본과 전류의 역상성분만을 보상하면 되므로 직류측 dc 전압이 작아도 되기 때문에 문헌 [4]의 방식과 비교하여 인버터 스위치의 전압 및 전류정격이 현저히 작아진다.

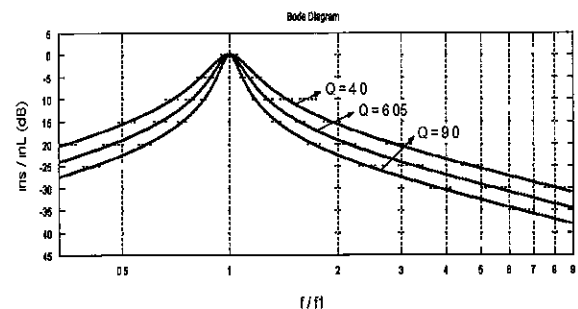


그림 3 보상특성
Fig 3 Compensation characteristics

2.2 시뮬레이션

제안한 방식의 시뮬레이션에 사용된 시스템 정수는 다음과 같다

- 전원 120V(상전압, 실효값), 60Hz, $L_s = 0.35\text{mH}$

$$\frac{I_{nS}(s)}{I_{nL}(s)} = \frac{\left(\frac{1}{L_f} \frac{\omega_0}{Q} K_c \cdot K_{AMP} \right) s}{s^3 + \left(\frac{R}{L_f} + \frac{K_c \cdot K_{AMP}}{L_f} + \frac{\omega_0}{Q} \right) s^2 + \left(\frac{R \omega_0}{L_f Q} + \frac{K_c \cdot K_{AMP} \omega_0}{L_f Q} + \omega_0^2 \right) s + \left(\frac{R}{L_f} + \frac{K_c \cdot K_{AMP}}{L_f} \right) \omega_0^2} \quad (3)$$

- 부하 6kVA, 커패시터와 저항부하를 갖는 3개의 단상 다이오드 정류기.
- 평형 부하 $C_a=C_b=C_c=3300\mu\text{F}$, $R_a=R_b=R_c=19\Omega$
- 불평형 부하 $C_a=C_b=C_c=3300\mu\text{F}$, $R_a=19\Omega$,
 $R_b=12\Omega$, $R_c=40\Omega$,
 $\text{UBF}(\text{unbalanced factor}) = 30\%$
- 능동필터 H-브리지 PWM 인버터,
 필터 인덕터 $L_f=1\text{mH}$,
 스위칭 주파수는 $f_{\text{sw}}=20\text{kHz}$
- zigzag 변압기 . 중간탭 상측, 하측=0.8:0.2
 즉, 다이오드정류기 dc 링크전압은 20V이다

그림 4는 부하가 평형일 때 제안한 능동필터의 시물레이션 파형이다. 부하가 평형임에도 불구하고 정류기 부하가 비선형이기 때문에 부하측 중성선 전류 i_{nL} 에는 3차, 9차, 그리고 15차 등의 과도한 3조파 전류가 흐른다. 부하측 상전류 i_{La} 의 실효치는 17.25A이고 중성선 전류 i_{nL} 은 29.89A로 상전류의 1.73배이다. 전원측 임피

던스가 zigzag 변압기의 영상성분 임피던스 보다 작기 때문에 인버터가 동작을 시작하기 전(즉, 바이패스 스위치가 닫혀 있을 때)에는 중성선 전류의 대부분이 전원측으로 흐르며, zigzag 변압기 쪽으로는 적은 양만 흐르게 되어 이 zigzag 변압기만으로는 중성선 전류의 제거가 잘 되지 않고 있음을 알 수 있다. 그러나, 인버터가 동작하게 되면 부하측 중성선에 발생된 3조파 전류는 거의 zigzag 변압기를 통하여 부하로 순환되며, 전원측 중성선 전류 i_{ns} 즉, 인버터 전류는 거의 0이 된다. 이때 부하측 상전류 i_{La} 의 THD는 98.9%이나 전원측 상전류 i_{sa} 의 THD는 57.5%로 감소한다. 그 이유는 zigzag 변압기를 통해 주입된 3조파 전류와 부하측 상전류의 3조파 전류가 서로 상쇄되어 전원측의 각 상에는 나타나지 않기 때문이다.

그림 5는 부하 불평형(UBF는 30%)일 때 제안한 능동필터의 시물레이션 파형이다. 각상 부하전류 i_{La} , i_{Lb} 및 i_{Lc} 의 실효값은 각각 17.25A, 25.81A 및 9.0A이다.

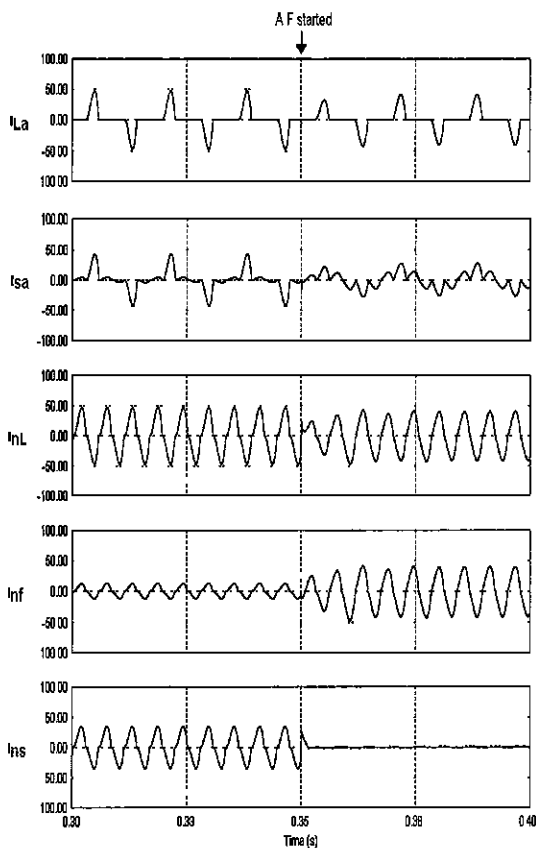


그림 4 부하평형일 때 시물레이션 파형

Fig 4 Simulated waveforms under balanced loading

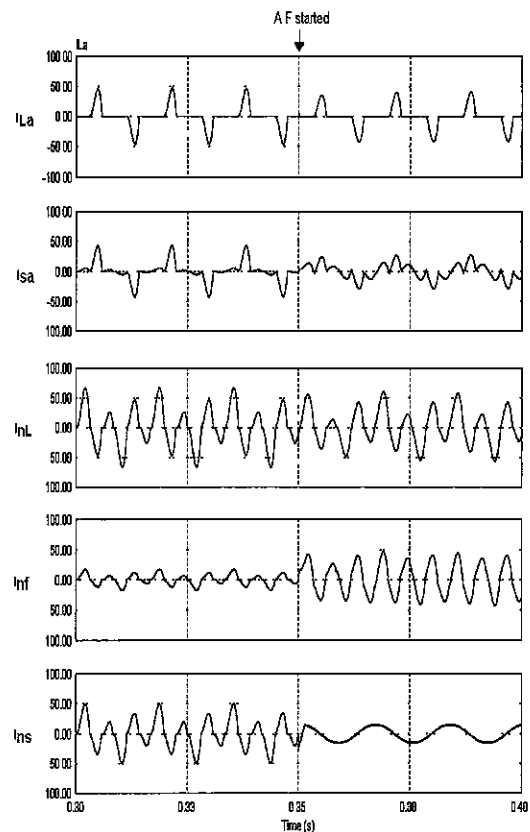


그림 5 부하불평형(UBF=30%)일 때 시물레이션 파형

Fig 5 Simulated waveforms under unbalanced loading (UBF=30%)

부하측 중성선 전류 i_{nL} 은 32.3A이며 고조파의 영상 성분뿐만 아니라 불평형에 의한 기본파의 영상성분도 포함한다. 인버터가 동작을 시작하면 이 기본파 영상 성분 전류는 인버터를 통해 전원측 중성선에 흐르게 되고, 이와 동시에 고조파 영상성분은 zigzag 변압기를 통해 흐르게 됨을 알 수 있다. 또한, 부하측 상전류 i_{La} , i_{Lb} 및 i_{Lc} 의 THD는 각각 101.1%, 88.1% 및 111.7%이나 전원측에서는 각각 59.1%, 48.7%, 110.2%로 감소한다.

2.3 인버터의 KVA정격

인버터 스위치의 KVA정격은 스위치의 피크(peak) 전류와 피크(peak) 전압의 곱으로 나타낸다. 제안한 방식에서는 부하 불평형에 의한 기본파 전류만이 인버터 스위치로 흐르기 때문에, 모든 3조파 전류가 인버터 스위치를 통해 흐르는 문헌 [4]의 방식보다 인버터 전류정격이 더 작다. 또한 제안한 방식의 인버터는 부하가 불평형인 경우에만 발생하는 기본파 전류만을 보상하면 되므로 3조파를 보상하는 문헌 [4]의 방식에 비해 요구되는 dc전압이 작아진다.

표 2는 커패시터 필터와 저항부하를 사용하는 경우 불평형 정도에 따른 각상 부하전류의 몇몇의 예를 나타낸다. 22절의 시뮬레이션 조건을 사용하여 표 2의 각 경우에 대한 제안한 방식과 문헌 [4]의 방식의 인버터 VA정격을 표 3에 나타낸다. 이때 문헌 [4]의 방식에서 평형부하일 때의 인버터 정격을 1pu으로 하였다. 각 경우에 제안한 방식의 인버터 정격은 문헌 [4]의 방식보다 훨씬 작으며 특히 제안한 방식에서 부하가 평형인 경우 중성선에 기본파 전류는 존재하지 않으므로 인버터의 정격은 이상적으로 0이 됨을 알 수 있다.

표 2 부하측 상 전류의 불평형 정도(UBFs)

Table 2 Load phase current for specified UBFs

UBF	$I_{La,l}$	$I_{Lb,l}$	$I_{Lc,l}$
0%	$16.67 \angle 0$	$16.67 \angle -120$	$16.67 \angle 120$
10%	$16.67 \angle 0$	$19.57 \angle -120$	$13.77 \angle 120$
30%	$16.67 \angle 0$	$25.37 \angle -120$	$7.97 \angle 120$
50%	$16.67 \angle 0$	$31.17 \angle -120$	$2.17 \angle 120$

표 3 각 시스템에서 요구되어지는 KVA정격

Table 3 Required KVA rating of the each system

UBF	Conventional system Inverter (pu)	Proposed system Inverter (pu)
0%	1	0
10%	1.05	0.04
30%	1.27	0.11
50%	1.62	0.17

3. 실험 결과

제안한 방식으로 필터장치의 시작품을 제작하였으며 본 실험에서 사용한 정수는 다음과 같다.

- 전원 : 120V(상전압, 실효값), 60Hz, $L_s = 0.35\text{mH}$
- 부하 : 1kVA, 커패시터와 저항부하를 갖는 3개의 단상 다이오드 정류기
불평형 부하 $C_a = C_b = C_c = 3300\mu\text{F}$, $R_a = 160\Omega$, $R_b = 60\Omega$, $R_c = 100\Omega$ (UBF=30%).
- 능동필터 : H-브리지 PWM 인버터, 필터 인덕터 $L_f = 1\text{mH}$, 스위칭 주파수는 $f_{sw} = 20\text{kHz}$
- zigzag 변압기 : 중간탭 상측 하측=0.8:0.2
즉, 다이오드정류기 dc 링크전압은 20V 이다.

그림 6은 UBF = 30%인 불평형 부하일 때 제안한 방식의 각 전류파형을 보여준다. 실험 결과 부하 평형시 뿐만 아니라 부하 불평형시에도 시뮬레이션 결과와 일치함을 알 수 있다.

4. 결 론

본 논문에서는 3상 4선식 배전계통에서 중성선 전류를 제거하기 위한 저가형 능동전력필터가 제안되었으며 본 방식은 다음과 특징을 갖는다.

- 중성선 전류 제거특성이 시스템 임피던스에 영향을 받지 않으며 90%이상의 제거율을 나타낸다.
- 변압기를 낮은 영상성분 임피던스를 갖도록 특별히 설계할 필요가 없어 변압기의 크기가 작아진다.

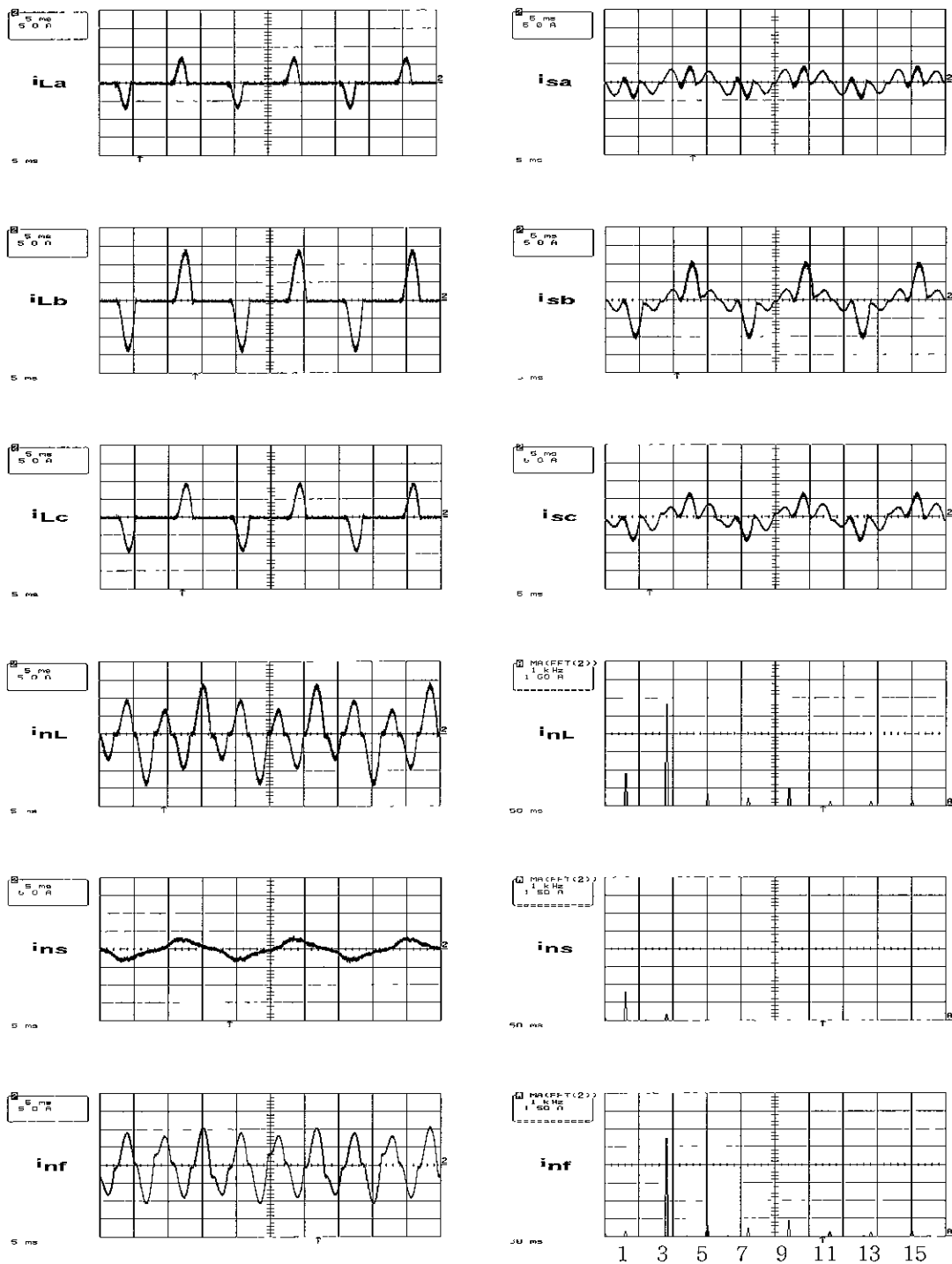


그림 6 부하불평형(UBF=30%)일 때 파형(5A/div, 5ms/div)과 주파수 스펙트럼(1 5A/div, 0 1kHz/div)
Fig 6 Experimental waveforms and frequency spectra under unbalanced loading(UBF=30%)

• 인버터는 부하 불평형시 기본파 영상전류만을 보상하므로 부하용량대비 인버터정격이 매우 낮다.

• 스위칭소자와 센서 수가 적고 제어가 간단하다.

• 중성선 전류뿐만 아니라 입력전류의 3조파 성분이 제거되어 입력전류의 THD도 개선된다.

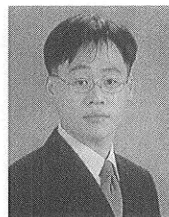
따라서 본 방식은 최근 3상 4선식 배전계통에서 발생하는 중성선전류 제거를 위한 저가형 능동필터로서 실용화 될 수 있다.

이 논문은 서울산업대학교 2002년도 학술연구비 지원에 의하여 연구되었음.

참 고 문 헌

- [1] T.M. Gruz, "A Survey of Neutral Current in Three-Phase Computer Power System", *IEEE Trans. on Ind. Appl.* vol. 26, no. 4, pp. 719~725, Jul/Aug. 1990.
- [2] P.P. Khera, "Application of Zigzag Transformers for Reducing Harmonics in the Neutral Conductor of Low Voltage Distribution System", *IEEE IAS Conf. Rec.*, pp. 1092, 1990.
- [3] C.A. Quinn and N. Mohan, "Active Filtering of Harmonic Currents in Three-Phase, Four-Wire Systems with Three-Phase and Single-Phase Non-Linear Loads", in *APEC*, pp. 829~835, 1992.
- [4] P.N. Enjeti and 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, pp. 1565~1572, Nov./Dec. 1994.
- [5] P.T. Cheng, Y.F. Huang, and C.C. Hou, "A New Harmonic Suppression Scheme for Three-Phase Four-Wire Distribution Systems", *IEEE APEC 2001 Conf. Rec.*, pp. 1287~1293.
- [6] 최세완, 장민수, 김태훈, 김기용, "3상 4선식 배전계통에서 중성선 전류 고조파의 제거를 위한 능동전력필터의 새로운 제어기술", *대한전기학회 하계학술대회 논문집 B 권*, pp. 1123~1125, 2001년 7월.

저 자 소 개



장민수(張敏洙)

1976년 6월 11일생. 2001년 서울산업대 제어계측공학과 졸업. 현재 동 대학원 제어계측공학과 석사과정.



최세완(崔世琬)

1963년 3월 3일생. 1985년 인하대 전자공학과 졸업. 1992년 미국 Texas A&M Univ. 대학원 전기공학과 졸업(석사). 1995년 동 대학원 졸업(박사). 1985년~1990년 대우중공업 중앙연구소 주임연구원. 1996년~1997년 삼성전기 종합연구소 수석연구원. 1997년~현재 서울산업대 제어계측공학과 조교수. 당 학회 편집위원.



김기용(金基勇)

1943년 1월 4일생. 1965년 인하대 전기공학과 졸업. 1979년 동 대학원 전기공학과 졸업(석사). 1990년 중앙대 대학원 전기공학과 졸업(박사). 현재 서울산업대학교 제어계측공학과 교수.