

# 부하변동 시의 고조파제거 및 절전기 개발

(Development of the Harmonics Reduction and Energy Saving Equipment in Variable Loads)

송영복\* · 조용현 · 최동진

(Young-Bok Song · Yong-Hyun Cho · Dong-Jin Choi)

## 요 약

본 연구에서는 부하의 변동 시에 고품질의 전력을 얻기 위하여 중성선과 전력선에 흐르는 각각의 영상 전류 성분과 제3고조파 전류 성분을 감소시킬 수 있는 Zig-Zag 변압기, 그리고 그 변압기의 2차측에 3상 브리지 정류기와 커패시터로 구성된 단상 능동 필터를 제작하였다. 이 단상 능동 필터를 변압기와 비선형 부하에 연결시켜 각 상에 보상 전류를 발생시킴으로써, 비선형 부하로 인하여 발생하는 제3고조파 성분을 감소시킬 수 있었다.

## Abstract

In this study, in order to obtain high quality of electric power, single phase active filter which is composed of Zig-Zag transformer and three phase bridge rectifier and capacitor at the secondary of its transformer to be able to reduce the components of the zero phase current and the third harmonic current in neutral line and power line respectively. By connecting this filter to the Zig-Zag transformer and nonlinear load, their third harmonic components due to the nonlinear loads were reduced.

Key Words : single phase active filter, third harmonic current, Zig-Zag transformer

## 1. 서 론

현대 산업 문명의 급속한 발달에 따라, 컴퓨터와 같은 전력기기 성능의 발달로 인하여 선로 상에 고조파가 발생하기 때문에 이를 저감시켜 고품질의 전력을 얻기 위한 욕구는 더욱 증대되고 있다. 고조파 전류의 발생 원인으로는 전력 변환 장치와 같이 부

하에 스위칭이 있게 되면 스위칭 순간에 구형파 혹은 펄스 형태의 전류가 흐르게 된다. 즉 스위칭 직전의 전류 값에서 스위칭 후의 전류로 동작이 이루어지는 과정에서 전류의 변화율이 크게 나타나는 것이다. 따라서 스위칭 과정에서의 큰 전류 변화율은 스위칭 순간 불연속적인 전압 강하를 일으키며 부하 입력 단에서 측정된 전원의 파형에는 순간 전압강하 성분이 내재된다.

이러한 현상이 나타나는 것은 일반적으로 정현파 전압에 대하여 비정현파의 전류, 즉 고조파의 성분을 포함한 전류가 흐르는 데서 기인한다. 그러므로

\* 주저자 : 경원대학교 대학원 전기전자공학과 박사과정  
Tel : 02-474-1235, Fax : 02-484-9701  
E-mail : hydwg@chol.com  
접수일자 : 2006년 6월 1일  
1차심사 : 2006년 6월 7일, 2차심사 : 2006년 6월 15일  
심사완료 : 2006년 6월 21일

## 부하변동 시의 고조파제거 및 절전기 개발

전력용 반도체소자를 이용한 전력 변환 장치들이 아니라 하여도 배전용 변압기의 여자 전류나 형광등과 같은 방전 방식의 전등 등과 같이 고조파 전류가 흐르는 부하는 정도의 차이만 있을 뿐 모두가 고조파를 발생시키는 원인이 될 수가 있으며 이러한 부하를 통칭하여 비선형 부하라고 한다.

이러한 고조파 발생에 대한 대처 방안으로는 수동 필터나 능동 필터를 이용하는 방법이 있으며[1], 수동 필터의 경우 일정 주파수 대역에서 고조파 저감 능력이 탁월하나 고조파 제거 능력이 전원 임피던스의 크기에 좌우된다는 점에서 현실적으로 해결하기 어려운 문제점으로 남아 있어 필터와 전원이 고조파 입장에서 볼 때 병렬로 접속되어 있으므로 고조파 전류의 제거 정도는 필터 자체의 임피던스와 전원 임피던스의 비율에 좌우되기 때문에 전원의 임피던스를 측정할 수 있어야 수동 필터를 용이하게 이용할 수가 있다.

그러나 현실적으로 전원의 임피던스를 측정하는 것이 어렵고, 임피던스가 계통의 접속 상태에 따라 크기가 변화하므로 계통의 부분적인 차단이나 투입으로 구성이 달라지면 필터로서의 성능이 영향을 받으므로 일정 성능을 기대하기 어렵다.

능동 필터의 개념은 비선형 부하가 요구하는 고조파 전류를 필터를 이용하여 강제로 주입하여 줄으로써 전원 대신에 고조파 전류를 부담하고 있다.

능동 필터는 기존의 수동필터를 이용하는 방식과 비교하여 공진의 문제점이 없으며 설치시의 비용 면에서도 수동 필터보다 우수하다고 알려져 있다.

능동 필터는 애초에 전원의 고조파 전류의 제거만을 위해 개발되었으나 임의의 전류 제어를 통해서 전류의 고조파뿐만 아니라 무효 성분까지도 제거할 수 있음이 입증되면서 고조파 및 무효 전력 제거에 까지 이용되고 있다.

3상 4선식 고조파 전력 필터 장치는 전력 계통 라인에서 중성선의 고조파 전류를 제거하는 능동 필터의 한 종류이다[2].

국내에서 일반적인 저전압 전력 전송 시스템은 3상 4선 식의 380/220[V]로 구성된다. 이들 시스템은 빌딩들과 공장들의 내부에 전기 에너지를 보급하도록 거시적으로 채택되었다. 거의 균형적인 부하의

통상적인 구동 조건에서의 이러한 시스템들은 중성선의 전류가 작고 통상적인 상전류 크기의 20[%]를 초과하지 않는다.

그렇지만 최근 몇 년 동안에 사용 부하들의 정지 상태 전력 변환 장비의 이용은 엄청나게 증가하였다. 3상 4선식의 저전압 시스템에 현재 연결된 통상적인 부하는 속도 조절이 가능한 냉·난방 시스템과 형광등 회로 등의 안전 저항, 컴퓨터 시스템, 그리고 다른 민감한 전기적 부하들이 있다. 이들 부하들은 모두 상당 부분이 3고조파 성분(180[Hz])으로 과도한 고조파 전류를 만드는 스위치 모드 형태의 전력 전자 컨버터이다. 3고조파의 홀수 곱의 성분(즉 9, 15고조파 등의)은 사실상 더하여 지더라도 중성선에서 제거할 수 없다. 이들 고조파 전류는 중성선을 통하여 전력 시스템에 되돌아 흐르게 된다.

그러므로 현재의 3상 4선식 배전 시스템에서의 중성선은 종종 과도한 전류가 흐르게 된다. 어떠한 임의의 장치들의 경우에는 중성선의 전류 크기가 상전류의 크기를 초과하기도 한다. 과도한 중성선 전류는 열적 주기와 중성선 초과로 접지 전압 강하에 의한 노이즈의 원인이 되고 민감한 전기적인 장비에 결정적인 피해를 입힐 수 있다.

이에 따라 본 연구에서는 고조파 저감 절전기를 개발하여 중성선에 흐르는 영상분의 전류를 제거함으로써 계통의 고조파 성분을 저감시켜 기본파 성분을 증대하여 고품질의 전력을 얻고, 아울러 절전의 기능도 함께 갖게 한다.

## 2. 고조파 저감 장치의 제어보드 개발

### 2.1 제어보드의 설계

본 연구에서 개발한 고조파 저감 필터의 제어기는 제어 보드에 설치된 Low pass filter에 의하여 스위칭 주파수를 10[KHz]로 제한하였다. 중성선에서 유입되는 전류의 파형은 90[%]이상 3 고조파로 구성되며 단상 출력 전류의 파형은 고조파이므로 유입되는 전류의 파형은 Low pass filter를 거치면서 제한되도록 한다. 또 각각 파형의 게인(gain)을 조정하기 위하여 P제어기와 PI제어기를 사용하여 응답 속도

를 최소화하였다. 다음의 그림 1은 Zig-zag변압기를 거쳐 능동필터를 지나는 고조파 전력 필터 장치의 시스템 구성도이다[3-4].

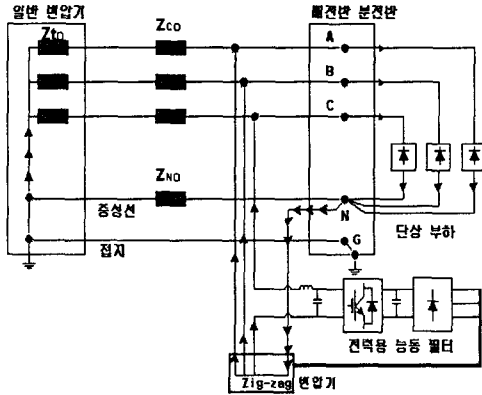


그림 1. 고조파 전력 필터 장치의 시스템 구성도  
Fig. 1. System block diagram for harmonics electric power filter

## 2.2 3상 4선식 고조파 전력 필터 장치의 설계

### 2.2.1 고조파 저감 필터의 기본적인 기능

- 고조파 전력 필터 장치의 기본적인 기능들은
- (1) 중성선에서 발생된 고조파 전류인 3 배수 고조파 전류 성분을 제거.
  - (2) 기능 향상이 쉽고 3상 4선식의 3고조파 성분이 큰 설비 부하에 자동으로 적용이 가능함
  - (3) 전원 임피던스가 갖는 공진회로와 같은 형태가 아니라 효율적으로 필터링을 함[5].
  - (4) 불평형 부하 조건에서도 동작(단, 불평형 시에 부하 분담이 가장 큰 부하를 기준으로 부하의 용량이 고조파 저감 필터의 용량 한도에 있어야 함.)
  - (5) 3상 4선식 시스템에 적용하며 계통에 병렬로 연결됨
  - (6) 영상 전류 제어를 위한 제어 보드의 장착 등을 고려하였다[6].

### 2.2.2 고조파 저감 장치의 결선 방법

다음의 그림 2는 고조파 저감 장치의 분전반(배

전) 결선도이다. 결선에는

- (1) 고조파 필터와 배전반 혹은 분전반까지 케이블을 연결한다.
- (2) 전력용 능동필터로 사용된 인버터의 동작을 위하여 중성선의 상태를 모니터링하기 위한 중성선 전류 감지 센서를 N상 중에서 부하 쪽으로 출력되는 부분에 설치한다.

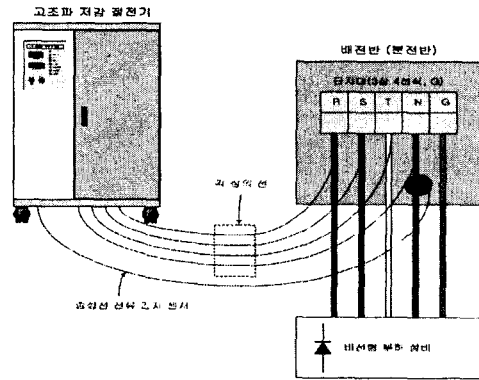


그림 2. 고조파 저감 장치의 분전반(배전반) 결선도  
Fig. 2. A connection diagram of cabinet board (distributing board) for harmonics reduction energy saving

### 2.2.3 판넬 내부의 회로 구성도

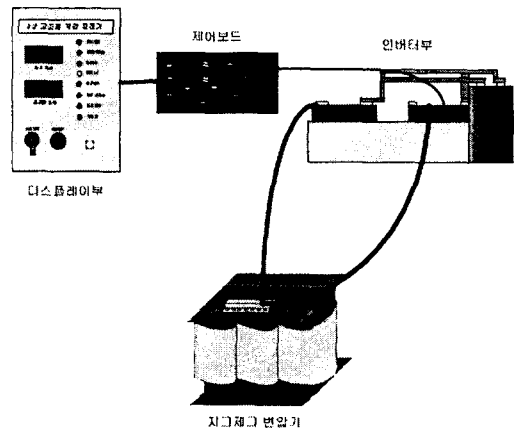


그림 3. 판넬 내부의 회로 구성도  
Fig. 3. A circuit diagram of the inside panel

판넬 내부의 회로 구성(그림 3)은 제어보드를 중심으로 디스플레이부에 신호선을 연결하여 각각의

부하변동 시의 고조파제거 및 절전기 개발

동작에 대한 상태를 디스플레이한다. 그리고 제어보드 내의 게이트 드라이버를 이용하여 인버터의 브리지 모듈에 신호를 전달한다.

주 전원은 Zig-zag 변압기를 통하여 220[V]를 공급받고 3상 브리지 모듈에 55[V]의 전원을 인가하여 DC 링크단의 커패시터에 에너지를 충전하고, 이 에너지에 의하여 전원 쪽의 고조파 보상 파형을 출력하는데 이용한다[7].

3. 고조파 필터의 시작품 및 실험 결과

3.1 모의실험 파형

본 고조파 절전기의 모의실험은 Powersim 사의 Psim 4.5를 사용하였다.

수전 라인은 3상 4선식의 시스템으로 구성하였으며 3상의 부하는 3개의 그룹으로 나뉘고 평형 부하 상태에서 실험하였다. 각 그룹은 브리지 다이오드와 인덕터 그리고 커패시터와 저항으로 부하를 구성하여 실험하였다. 그림 4에는 각 상에서의 부하 전류의 파형을, 그림 5에는 이에 대한 FFT분석 파형을 나타내었다. 또 그림 6에는 각 상의 입력 전류의 보상 파형을, 그림 7에는 이에 대한 FFT분석 파형을 나타내었다.

그림 8에는 Zig-zag 변압기 각 상의 출력 전류 파형을, 그림 9에는 이의 FFT분석 파형을 나타내었다.

또 그림 10에는 중성선 각 위치에서의 고조파 분석 파형을, 그림 11은 이에 대한 FFT분석 파형을 나타내었다. 그리고, 표 1에서는 모의실험을 한 각 부하들의 변수 값을 나타내었다.

표 1. 모의실험의 부하 변수  
Table 1. Load variables for simulated experiments

소자 명	각 Device의 Parameter
저항	9.6[Ω]
인덕턴스	1.2[mH]
커패시터	4700[μF]
단상 브리지 다이오드	220[V] 60[A]

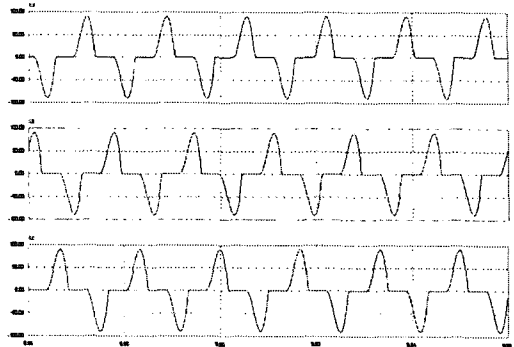


그림 4. 각 상의 부하 전류의 파형  
Fig. 4. A waveform diagram of load current to each phase

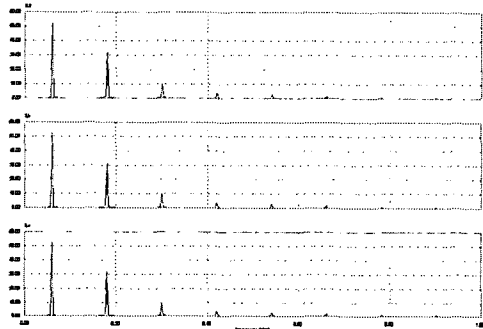


그림 5. 각 상의 부하 전류 파형의 FFT분석 파형  
Fig. 5. FFT analysis waveform of load current wavefor to each phase

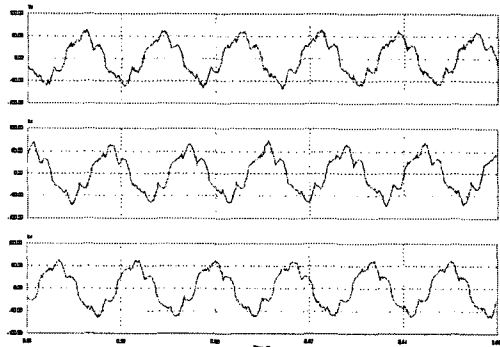


그림 6. 각 상의 입력 전류의 보상 파형  
Fig. 6. Compensating waveform of input each phase

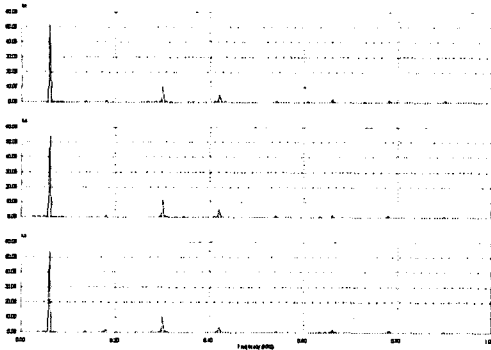


그림 7. 각 상의 입력 전류의 보상 파형의 FFT분석 파형  
Fig. 7. FFT analysis waveform for compensating waveform of input current to each phase

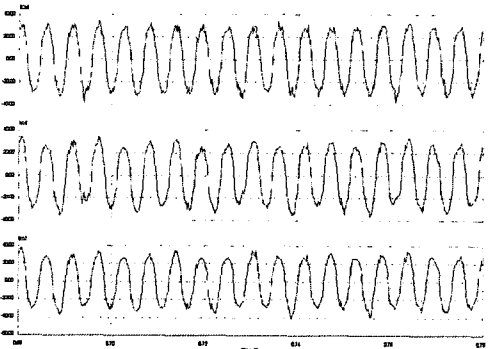


그림 8. Zig-zag 변압기 각 상의 출력 전류 파형  
Fig. 8. Output current waveform to each phase of zig-zag transformer

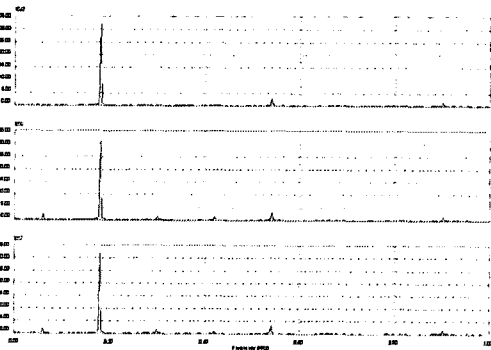


그림 9. Zig-zag 변압기 각 상의 출력 전류 파형의 FFT분석 파형  
Fig. 9. FFT analysis waveform in output current waveform to each phase of zig-zag transformer

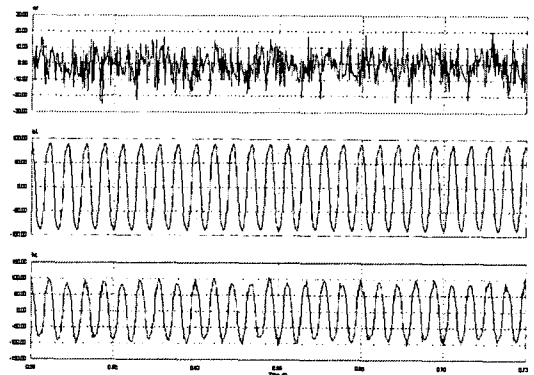


그림 10. 중성선 각 위치에서의 고조파 분석 파형  
Fig. 10. Harmonics analysis waveform to each position of neutral conductor

- 상 : 전원측 중성선에서의 고조파 보상에 의한 중성선의 전류 파형
- 중 : 부하 전류에 의하여 발생된 3고조파 성분의 영상 전류 파형
- 하 : 고조파 전력 필터 장치에서 출력되는 고조파 보상 전류 파형

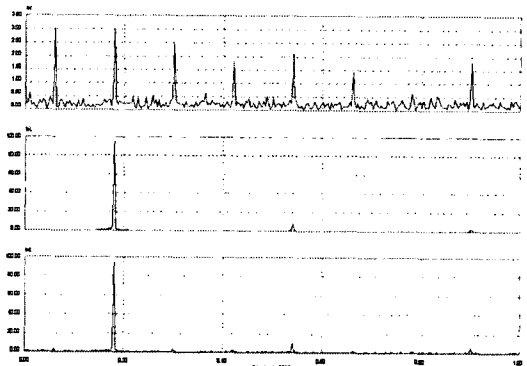


그림 11. 중성선 각 상의 고조파 파형에 대한 FFT분석 파형  
Fig. 11. FFT analysis waveform to harmonics waveform of each phase in neutral conductor

### 3.2 고조파 저감 필터의 실험 파형

그림 12~19는 고조파 저감 필터의 실험 파형이다. 그림 12에서는 제어기의 GATE 신호의 출력 파형을 나타낸다.

또 그림 13은 모의실험에서 단상능동필터에 나타나는 풀 브리지 인버터의 출력 전압, 전류 실험 파형이며, 그림 14는 고조파 보상된 전원 전류 파형이고,

부하변동 시의 고조파제거 및 절전기 개발

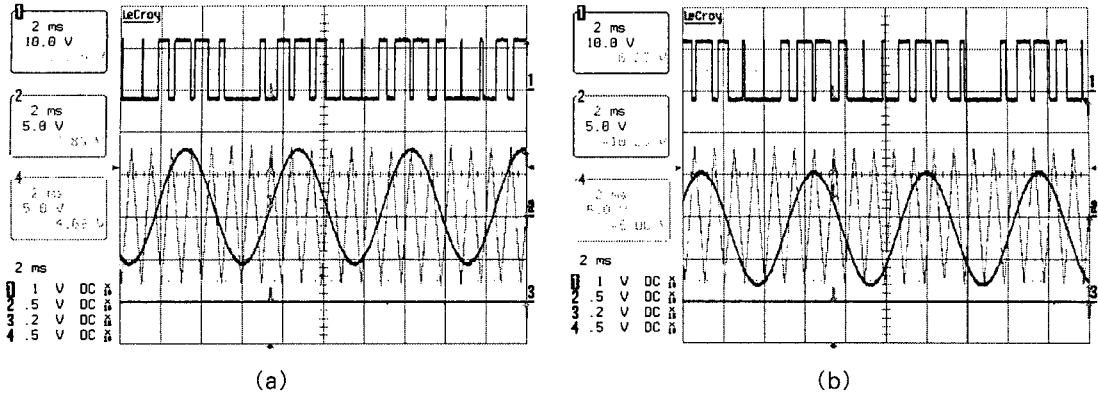


그림 12. 입력 전류 파형의 비교 파형  
Fig. 12. Comparison waveform of input current waveform

1. Gate Signal 출력 파형
  2. 중성선에 흐르는 영상분 전류의 파형
  3. 단상 능동필터의 출력 전류 파형
- (a) 영상분의 약 +1[V] 파형, (b) 영상분의 약 -1[V] 파형

그림 15는 부하 측의 부하 전류 측정 파형이다.

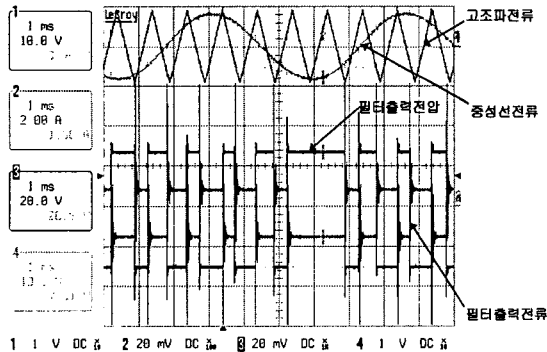


그림 13. 단상 능동 필터에서, 가상의 전류 센싱 입력 신호들에 있어서의 직류 링크 측에 나타나는 30(V)입력 전압에 의한 풀 브리지 인버터의 출력 전압, 전류 실험 파형

- Fig. 13. Output voltage end current experiment waveform applied 30(V) of output voltage, a side direct current link of input signal to single phase active filter to Full - Bridge inverter
1. 단상 Active Power Filter 출력의 전류 신호(10(V/Div))
  2. 중성선 전류의 3고조파 신호(10(V/Div))
  3. 단상 능동 필터의 출력 전압 파형 R부하조건(20(V/Div))
  4. 단상 능동 필터의 출력 전류 파형 R부하조건(2(A/Div))

그리고 그림 16에는 Zig-zag 변압기 측의 보상 전류 파형을 나타내었으며, 그림 17은 이에 대한 부하 측 중성선의 전류 파형이다. 또 그림 18과 그림 19는 전원측 중성선에 흐르는 보상된 중성선 전류의 파형과 이의 확대된 파형을 나타낸다.

### 3.3 고조파 저감 절전기의 실험 결과

제작한 고조파 저감 절전기의 실험 결과는 다음과 같다. 표 2는 고조파 저감 절전기의 모의실험에서의 보상시 및 비보상시에 각 고조파에서의 전류 값이며, 이에 대한 전류 및 고조파 도표를 그림 20에 나타내었다. 그림 21은 보상시 및 비보상시에 각 고조파의 백분율을 나타낸 도표이다.

표 2. 고조파 저감 절전기의 실험  
Table 2. Experiment of power saving of harmonics reduction

	기본파	3 고조파	5 고조파	7 고조파	9 고조파	11 고조파	13 고조파	15 고조파
보상 시 전류[A]	59	3	15	4	0.5	3	1	0
비보상 시 전류[A]	57	41	13	4	3	0.5	0.5	0.5

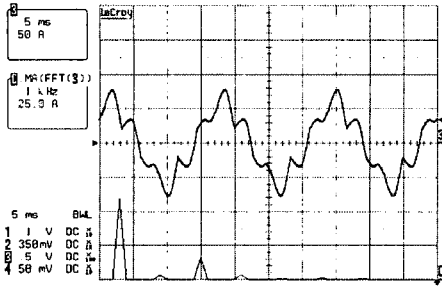


그림 14. 고조파 보상으로 보상된 전원 전류 파형  
 Fig. 14. Power current waveform of harmonic compensating  
 3) 보상된 전류 파형(50(A/Div))  
 C) 보상된 파형의 FFT분석파형(25(A/Div))

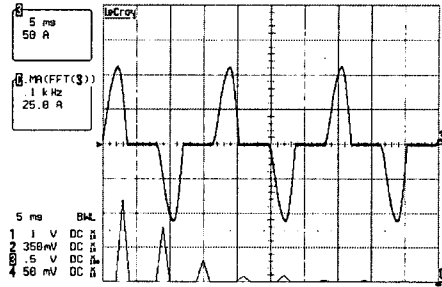


그림 15. 부하 측의 부하 전류 측정 파형  
 Fig. 15. Measurement waveform of load current to the load side  
 3) 부하 전류 파형(50(A/Div))  
 C) 부하 전류 파형의 FFT분석파형(25(A/Div))

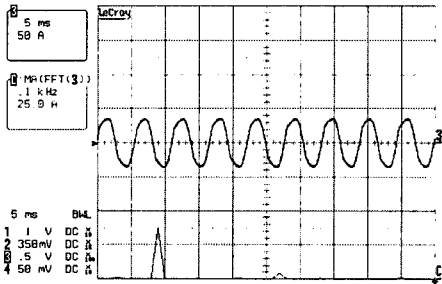


그림 16. Zig-zag 변압기 측의 보상 전류 파형  
 Fig. 16. Compensating current waveform of zig-zag transformer side  
 3) Zig-Zag 변압기 출력 전류 파형(50(A/Div))  
 C) 출력 전류 파형의 FFT분석파형(25(A/Div))

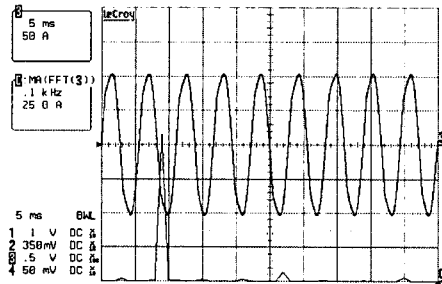


그림 17. 부하 측 중성선의 전류 파형  
 Fig. 17. Current waveform of neutral conductor to the load side  
 3) Zig-Zag 변압기 출력 전류 파형(50(A/Div))  
 C) 출력 전류 파형의 FFT분석파형(25(A/Div))

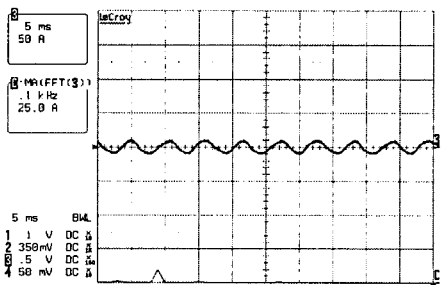


그림 18. 전원 측 중성선에 흐르는 보상된 중성선 전류의 파형  
 Fig. 18. Compensating current waveform flowed in neutral conductor of the power source side  
 3) 전원 측 중성선에 흐르는 보상된 중성선 전류 파형(50(A/Div))  
 C) 출력 전류 파형의 FFT분석파형(25(A/Div))

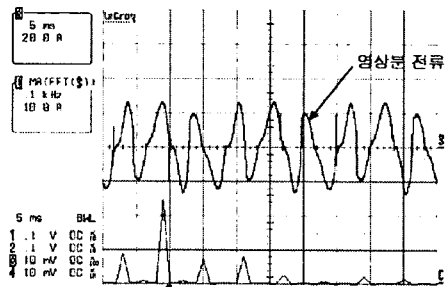


그림 19. 전원 측 중성선에 흐르는 보상된 중성선 전류의 확대된 파형  
 Fig. 19. Amplified waveform of compensating current flowed in neutral conductor of the power source side  
 3) 전원 측 중성선에 흐르는 보상된 중성선 전류 파형(20(A/Div))  
 C) 출력 전류 파형의 FFT분석파형(10(A/Div))

부하변동 시의 고조파제거 및 절전기 개발

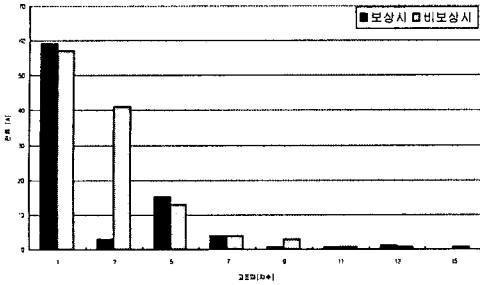
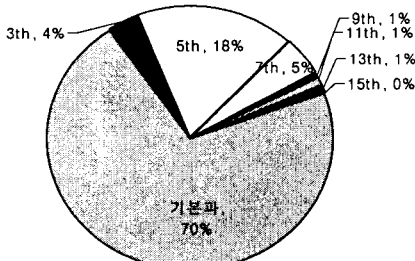
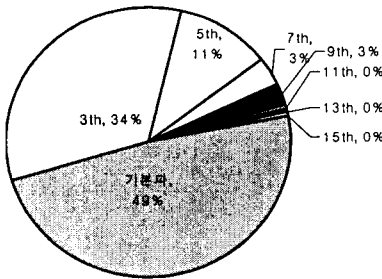


그림 20. 표 2 에 의한 전류-고조파 도표  
Fig. 20. Chart of current-harmonic by Table 2



(a) 보상 시



(b) 비보상 시

그림 21. 각 고조파의 백분율  
Fig. 21. Percentage of each harmonics

- 1) 고조파 비보상 시 전체 요구 왜곡율(THD)= 75.98[%]
- 2) 고조파 보상 시 전체 요구 왜곡율(THD)=2 7.34[%]
- 3) 고조파 포함 시 전체 전류값=119.5[A]
- 4) 고조파 보상 시 전체 전류값=85.5[A]
- 5) 고조파 포함 시의 전체 전류의 고조파 포함 비

율=52.3[%]

- 6) 고조파 보상 시 전체 전류의 고조파 포함 비율 =31.0[%]
- 7) 고조파 저감 비율=21.3[%]

4. 결 론

본 연구를 통하여 Zig-zag 변압기와 단상 능동 필터를 사용한 시스템이 한 개의 상을 제어함으로써 다른 상의 제어가 원활하게 이루어지고 있음을 확인할 수 있다. 그러나 직접 제어되지 않는 상에 대한 보상은 각 라인의 임피던스와 커패시터 값의 차에 의하여 편차가 있음을 확인할 수 있었다.

주요 연구 결과는 다음과 같다.

- (1) 단상 능동 전력 필터 시스템(Single Phase Active Power Filter System)의 개발
- (2) 실험을 위한 비선형 부하용(Nonlinear Load) 부하 및 시스템 개발
- (3) 시제품(Prototype)을 이용한 3배수 고조파 저감기의 개발
- (4) 고조파 보상부에 의한 절전기 개발

본 연구에서의 실험을 통하여 3배수 고조파의 저감에 대한 효과로서 실제 실험 파형에서 고조파가 저감됨을 확인할 수 있었으며 실험값에서 비보상 시의 전류의 전체 왜곡율은 75.98[%]이고 보상 시의 왜곡율은 27.34[%]로 고조파가 저감되었다.

이를 통한 고조파 저감의 기대 비율은 수치상으로 48.64[%]였으며 대비 고조파 저감 기대치는 비보상 시가 보상 시에 대하여 약 2.8배 정도의 고조파 함유 비율이 높은 것으로 측정되었다.

전체 고조파 포함 시의 보상 시와 비보상 시의 전류의 차는 약 34[A]정도였으며 피크 값 대비 저감 비율은 비보상 시 104[A]로 측정된 반면 보상 시는 79[A]로 저감되어 25[A]가 낮아져서 시스템의 안정화를 기대할 수 있다. 또한 절전 효과 기대치는 고조파 포함 비율을 기준으로 대비한 결과는 21.3[%]증가의 우수한 결과 값을 얻었다.

본 연구의 차후의 개발은 제품의 고급화와 원활한 제어가 가능하도록 하기 위하여 제어부의 디지털화



를 하여야 할 것이다. 오동작이나 고장 시 고조파 저감 필터를 실시간으로 제어하기 위해서는 제어부에 DSP(Digital Signal Processor)를 장착함으로써 제어와 함께 통신의 기능과 다른 디바이스에 이를 통보하는 기능을 갖출 수 있어 제품의 안정성을 높일 수 있으며 높은 신뢰도를 확보하는 것이 용이하여야 한다. 또한 제어부에 삽입된 필터부의 보완으로 세밀한 제어가 가능하도록 하고, 필터 전면에 그래픽 LCD를 장착하여 보다 많은 기능을 확보해야 한다.

## References

- [1] Asif Jakwani, Paul Jeffries, Prasad Enjeti, and Jose Rangel, "Actively Eliminate the Harmonics in Your Facility", Power Quality Assurance Magazine, Jan./Feb., 1998.
- [2] F.Z. Peng, George W. Ott, and D.J. Adams, "Harmonic and Reactive Power Compensation Based on Generalized Instantaneous Reactive Power Theory for Three-phase Four-wire Systems", IEEE Trans. On Power Electronics, Vol. 13, No.6, pp. 1174-1181, Nov., 1998.
- [3] F.Z. Peng, H. Akagi, and A. Nabae, "A Novel Harmonic Power Filter ", PESC '88, pp. 1151-1158, 1996.
- [4]. Khera, P.P. "Application of zigzag transformers for reducing harmonics in the neutral conductor of low voltage distribution system" Industry Applications Society Annual Meeting, Conference Record of the 1990 IEEE, 7-12 Oct 1990 pp. 1092 vol.2 1990.
- [5] S. Bhattacharya, T.M. Frank, D.M. Divan, and B.Banerjee, "Parallel Active Filter System Implementation and Design

Issues for Utility Interface of Adjustable Speed Drive Systems", IAS '96, pp. 1032-1039, 1996.

- [6]. Fukuda, S. Yamaji, M. "Design and characteristics of active power filter using current source converter" Industry Applications Society Annual Meeting, Conference Record of the 1990 IEEE , 7-12 Oct 1990 Page(s): 965 -970 vol.2 1990.
- [7]. Duffey, C.K. Stratford, R.P. "Update of harmonic standard IEEE-519: IEEE recommended practices and requirements for harmonic control in electric power systems" Industry Applications, IEEE Transactions on, Volume: 25 Issue: 6, pp. 1025 -1034 Nov/Dec 1989.

## ◇ 저자소개 ◇

### 송영복 (宋永福)

1961년 2월 24일생. (주)한양전력기술사무소 대표이사. 건축전기설비기술사. 현재 경원대 대학원 전기전자공학과 박사과정.

### 조용현 (趙容鉉)

1959년 5월 26일생. 1985년 서울산업대 전기공학과 졸업. 1990년 졸업(석사). 2001년 졸업(박사). 중앙대 전기공학과 대학원 졸업. 현재 세빛(주) 대표이사.

### 최동진 (崔東震)

1945년 8월 6일생. 1972년 한양대 전기공학과 졸업. 1980년 연세대학교 졸업(석사). 1985년 중앙대학교 졸업(박사). 1997~1998년 동경공업대 전자물리학과 해외 파견교수(학진). 2004년 Johns Hopkins대 전기공학과 연구교수. 현재 경원대 공대 전자·전기정보공학부 교수.