

# 상업용 설비 부하의 중성선 영상전류 저감장치 분석 및 적용에 관한 연구

(A Study on the Analysis and Application of Neutral Line Zero Sequence Currents  
Reduction Device in Commercial Facility Loads)

김경철\* · 이일무 · 백승현

(Kyung-Chul Kim · Il-Moo Lee · Seung-Hyun Paik)

## 요 약

현대 사회 전반에 걸쳐 개인용 컴퓨터와 같은 비선형 부하가 증가하여, 중성선에는 많은 고조파 전류가 흐른다. 3상 4선식 배전계통을 채용하는 중성선에 과도한 고조파 전류가 흐르면 여러 가지 고조파 장애를 일으킨다. 중성선 고조파 저감 대책으로 지그재그 변압기를 이용하는 영상 필터가 널리 쓰이고 있다. 본 논문에서는 상용화된 중성선 영상 전류 저감장치를 분석하고, 고조파를 저감시키기 위해서 상업용 설비 부하에 적용하고자 한다. 실측한 값과 MATLAB으로 시뮬레이션한 값을 수치와 그래프로 비교해 보았다.

## Abstract

With the proliferation of nonlinear loads such as commercial facilities in all of modern society high neutral harmonic currents have been observed. High neutral currents in three-phase four-wire distribution systems can cause lots of harmonic problems. The most common solution of neutral harmonic currents reduction is a zero phase sequence filter using zig-zag transformer. This paper analyzes a commercially available neutral line zero sequence currents reduction device and applies the equipment to commercial office loads for eliminating harmonics. Experimental results are compared numerically and graphically with simulation results through the use of MATLAB.

Key Words : Neutral Harmonic Currents, Total Harmonic Distortion, Zero sequence Currents Reduction Device

## 1. 서 론

컴퓨터부하와 같은 비선형 부하가 널리 쓰이고 있다[1]. 이들 비선형 부하는 3상 4선식 배전시스템을 채용하는 중성선에 고조파를 발생시키는 주요 원인이 된다[2].

과다한 중성선 전류는 중성선 도체의 과열, 배전

\* 주저자 : 홍익대학교 전기공학과 교수  
Tel : 041-860-2568, Fax : 041-863-7605  
E-mail : yangjier@hongik.ac.kr  
접수일자 : 2003년 11월 10일  
1차심사 : 2003년 11월 20일  
심사완료 : 2003년 12월 10일

변압기의 성능저하. 전압의 왜곡, 통신선 잡음, 전기 전자 장비의 오동작 등 고조파 장해를 일으키게 된다.

중성선의 고조파 전류를 저감시키는 일반적인 방법으로는 영상 전류 저감장치[3-5]를 사용한다. 지그 재그 변압기를 이용하여 영상 임피던스를 작게 하여 영상분(3배수 고조파) 전류를 상쇄시키는 원리이다.

본 논문에서는 상용화 되어있는 영상 전류 저감장치[6]를 종로 타워의 상업용 설비부하에 적용하여 중성선 영상전류 저감효과를 알아보고, MATLAB [7]으로 컴퓨터 시뮬레이션 하고자 한다.

## 2. 영상 전류 저감장치

중성선 영상 저감 장치는 그림 1과 같이 같은 철심에 2개의 권선을 반대방향으로 감은 것으로 지그 재그 변압기의 원리를 이용한다.

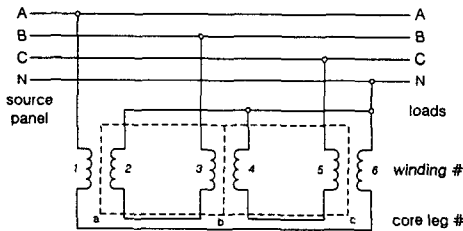


그림 1. 영상전류 저감장치 개요  
Fig. 1. Zero sequence current filter scheme

철심 a의 1번 권선은 직렬로 철심 c의 6번 권선에 연결되어 있고, 철심 b의 3번 권선은 직렬로 2번 권선에 연결되어 있다. 철심 c의 5번 권선은 4번 권선에 연결되어 있는 구조이다.

이런 구성으로 첫 번째 권선은 자기적으로 두 번째 권선과 결합되고, 세 번째 권선은 자기적으로 네 번째 권선과 결합되며 다섯 번째 권선은 자기적으로 여섯 번째 권선과 결합되어 있다. 일반적으로 각 권선은 같은 권선수를 가진다.

영상 전류 저감 장치의 기본 원리를 전압 관계식으로 이해할 수 있다.

$$\begin{aligned} V_{A1} &= V_{A2} = V_{m1} s \omega t + V_{m3} s 3 \omega t + V_{m5} s 5 \omega t + \dots \\ V_{B3} &= V_{B4} = V_{m1} s (\omega t - 120^\circ) + V_{m3} s 3 (\omega t - 120^\circ) \\ &\quad + V_{m5} s 5 (\omega t - 120^\circ) + \dots \\ V_{C5} &= V_{C6} = V_{m1} s (\omega t + 120^\circ) + V_{m3} s 3 (\omega t + 120^\circ) \\ &\quad + V_{m5} s 5 (\omega t + 120^\circ) + \dots \end{aligned}$$

여기서  $V_{A1}, V_{B3}, V_{C5}$ 는 3상 1차측 권선 전압이고,  $V_{A2}, V_{B4}, V_{C6}$ 는 2차측 권선 전압을 나타낸다.  $V_{m1}$ 에서  $V_{m5}$ 는 기본파의 전압의 크기이고, 첨자 1은 기본파를 표시한다.

각 상의 전압은 다음과 같이 구하면 된다.

$$\begin{aligned} V_{AN} &= V_{A1} - V_{B4} \\ &= \sqrt{3} V_{m1} s (\omega t + 30^\circ) + 0 + \sqrt{3} V_{m5} s (\omega t - 30^\circ) + \dots \\ V_{BN} &= V_{B3} - V_{C5} \\ &= \sqrt{3} V_{m1} s (\omega t - 90^\circ) + 0 + \sqrt{3} V_{m5} s (\omega t - 150^\circ) + \dots \\ V_{CN} &= V_{C5} - V_{A2} \\ &= \sqrt{3} V_{m1} s (\omega t + 150^\circ) + 0 + \sqrt{3} V_{m5} s (\omega t + 90^\circ) + \dots \end{aligned}$$

위에 식에서 알 수 있듯이 영상 전압은 상쇄되어 제거된다. 즉 부하에서 발생하는 영상 전류는 필터에 흡수된다. 이론적으로 필터는 영상 임피던스가 영이 되는 것과 같은 역할을 하게 된다.

영상분은 위상을 상호 반대로 하여 상쇄되게 하였으며 정상, 역상분은 벡터 합성이 되게 한 것이다. 즉 영상 임피던스는 작게 되어 영상분(3배수 고조파)은 필터에 흡수되게 설계되었다. 표 1은 영상 전류 저감 장치의 알고리즘을 간추려 놓았다.  $A^\circ$ 는 A상의 영상분,  $A^+$ 는 A상의 정상분  $A^-$ 는 A상의 역상분을 각각 나타낸다.

표 1. 영상 전류 저감장치 알고리즘  
Table 1. Zero sequence currents filter algorithm

Phase \ Sequence	A	B	C
Zero	$A^\circ - C^\circ$	$B^\circ - A^\circ$	$C^\circ - B^\circ$
Positive	$A^+ + C^+$	$B^+ + A^+$	$C^+ + B^+$
Negative	$A^- + C^-$	$B^- + A^-$	$C^- + B^-$

즉, 필터 설치전의 선로 전류는

$$\begin{aligned} I_A &= I_A^+ + I_A^- + I_A^\circ \\ I_B &= I_B^+ + I_B^- + I_B^\circ \\ I_C &= I_C^+ + I_C^- + I_C^\circ \\ I_N &= I_A + I_B + I_C \end{aligned}$$

와 같다. 필터 설치후의 선로 전류는

$$\begin{aligned} I_{AF} &= (I_A^- - I_C^-) + (I_A^+ + I_C^+) + (I_A^\circ + I_C^\circ) \\ I_{BF} &= (I_B^- - I_A^-) + (I_B^+ + I_A^+) + (I_B^\circ + I_A^\circ) \\ I_{CF} &= (I_C^- - I_B^-) + (I_C^+ + I_B^+) + (I_C^\circ + I_B^\circ) \\ I_{NF} &= I_{AF} + I_{BF} + I_{CF} \end{aligned}$$

으로 구하면 된다.

상업용 설비 부하의 중성선 영상전류 거감장치 분석 및 적용에 관한 연구

표 2는 고조파와 대칭 성분과의 관계를 요약해 놓았다.

표 2. 고조파와 대칭성분과의 관계  
Table 2. Relationship between Harmonics and Sequence components

Sequence components	Harmonics order
Positive	1, 4, 7, 10, 13, 16, 19, ...
Negative	2, 5, 8, 11, 14, 17, 20, ...
Zero	3, 6, 9, 12, 15, 18, 21, ...

그림 2는 MATLAB 시뮬레이션을 위한 회로도이다. 편의상 A상만 나타내었다.

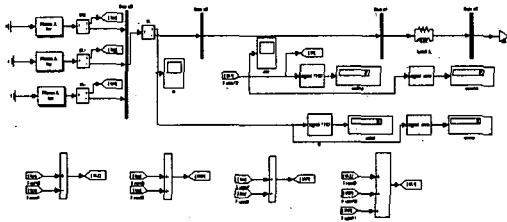


그림 2. MATLAB 시뮬레이션 회로도  
Fig. 2. Circuit diagram of MATLAB Simulation

### 3. 고조파 측정

고조파 전압 및 전류 측정은 서울의 종로 타워내의 한 변압기 2차측에서 수행하였다.

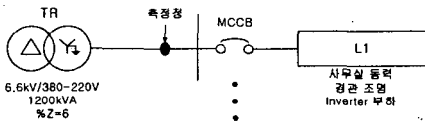


그림 3. 사례연구 배전 시스템  
Fig. 3. Single line diagram of the distribution system under study

그림 3는 사례연구 배전시스템의 단선도이다. 주 변압기는 6.6[kV]의 공급전압을 2차측에 380-220[V] 전압으로 낮추어 사무실 전원, 경관조명, Inverter 부하 등에 전력을 공급하고 있다.

종로타워는 서울 종로구에 있는 삼성 건물이 시공 한 건축물로 건축면적이 2,000[m<sup>2</sup>], 높이 134[m], 지

하 6층 지상 24층 규모이다. 용도는 업무시설, 판매 시설, 전시시설로 상업시설을 위한 것으로 계획되었다. 정보화 건축물의 이미지에 강하고 역동적이며 개방적인 디자인 개념을 도입했다.

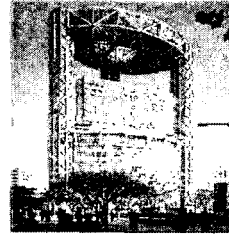


그림 4. 종로 타워의 외관  
Fig. 4. An outside view of Jongro tower

고조파 측정 장비는 BMI 모델 3030[A][8]를 사용하여 측정하였다. 그림 5의 BMI 모델 3030[A]는 노트북과 연결시켜 50차 고조파까지의 전류, 전압 및 전력을 측정하여 모니터에서 확인하고 컴퓨터에 데이터를 저장할 수 있다.

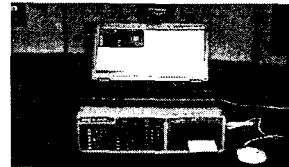


그림 5. BMI 측정 장비  
Fig. 5. BMI measurement equipment

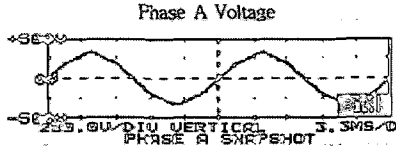
부하는 시시각각으로 변화하므로 어느 한 순간의 전압과 전류의 파형을 분석하여 고조파 함유율, 중성선 전류를 계산한다. 그림 6는 측정된 전압 파형이고, 그림 7은 전류 파형이다. 설치시 전력은 다음과 같다.

$$\begin{aligned}
 S_A &= 120.9 + j47.38 \text{ [kVA]} \\
 S_B &= 106.6 + j52.56 \text{ [kVA]} \\
 S_C &= 109.9 + j43.07 \text{ [kVA]}
 \end{aligned}$$

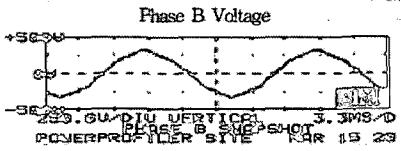
전압 파형은 비교적 고조파가 적은 정현파임을 알 수 있다. 표 3은 고조파 함유율 분석표로 제 5, 7 고조파가 제 3 고조파에 비해 상대적으로 크게 포함되어 있다. V<sub>A1</sub>에서 첨자 A는 A상을 나타내고, 숫자 1은 기본파를 의미한다. 측정된 실효치 상전압은 다

음과 같다.

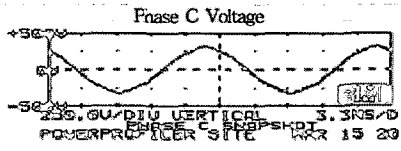
$$\begin{aligned} V_{AN} &= 213.5 \text{ [Vrms]} \\ V_{BN} &= 218.4 \text{ [Vrms]} \\ V_{CN} &= 214.6 \text{ [Vrms]} \end{aligned}$$



(a) A상

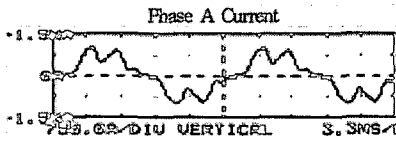


(b) B상

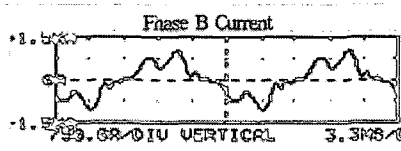


(c) C상

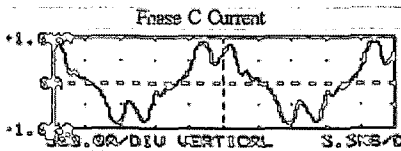
그림 6. 측정된 전압 파형  
Fig. 6. Measured voltage waveforms



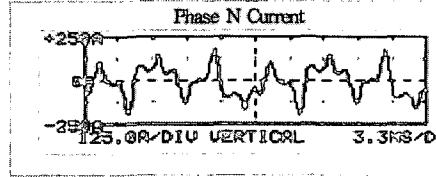
(a) A상



(b) B상



(c) C상



(d) N상

그림 7. 측정된 전류 파형  
Fig. 7. Measured current waveforms

표 3. 고조파 전압 측정

Table 3. Harmonic spectrum of voltage waveforms

고조파 차수	A상		B상		C상	
	크기(%)	위상(°)	크기(%)	위상(°)	크기(%)	위상(°)
1	100	0	100	-120	100	120
3	0.6	113	0.5	-9	0.4	118
5	2.7	2	2.6	129	2.3	-113
7	2.6	-173	2.4	60	2.2	-46
9	0.5	-115	0.6	-171	0.5	-85
11	0.5	-105	0.9	13	0.6	157
13	1.7	-24	1.3	-152	1.3	110
15	-	-	0.8	-52	0.7	84
17	0.5	-42	1.3	97	0.8	-97
19	0.1	112	0.1	151	0.3	-70
21	0.2	-173	0.2	44	0.1	118
23	0.3	176	0.2	-101	0.3	54
25	0.2	-91	-	-	0.1	97
27	0.1	36	-	-	-	-
29	-	-	-	-	0.1	-151
31	0.1	63	-	-	-	-

주]  $V_{A1} = 222.4 \text{ [Vrms]}$ ,  $V_{THDA} = 4.2 \text{ [%]}$   
 $V_{B1} = 220.7 \text{ [Vrms]}$ ,  $V_{THDB} = 4.2 \text{ [%]}$   
 $V_{C1} = 220.4 \text{ [Vrms]}$ ,  $V_{THDC} = 3.7 \text{ [%]}$

전류파형은 비선형 부하로 인하여 고조파가 많이 포함되어 있음을 그림 7에서 알 수 있다. 고조파 함유율 분석표는 표 4에 간추려 놓았다. 측정된 실효치 전류는 다음과 같다.

$$\begin{aligned} I_A &= 594.1 \text{ [Arms]} \\ I_B &= 556.4 \text{ [Arms]} \\ I_C &= 542.5 \text{ [Arms]} \\ I_N &= 83.1 \text{ [Arms]} \end{aligned}$$

표 4. 고조파 전류 측정  
Table 4. Harmonic spectrum of currents waveforms

고조파 차수	A상		B상		C상		N상	
	크기(%)	위상(°)	크기(%)	위상(°)	크기(%)	위상(°)	크기(%)	위상(°)
1	100	-15	100	-142	100	106	100	-76
2	0.5	-92	0.4	53	0.2	146	0.5	129
3	9.6	-168	9.8	70	8.2	-127	190.8	-6
4	0.5	94	0.5	-25	0.5	-150	0.3	-94
5	26.0	118	30.5	-112	26.7	7	60.5	-148
6	0.1	-108	-	-	-	-	2.9	76
7	17.0	-85	18.0	147	16.3	39	56.1	-48
8	0.1	-154	0.3	-22	0.2	115	0.6	-67
9	2.8	-15	3.5	-74	2.3	16	110.7	138
10	-	-	-	-	-	-	0.8	4
11	2.4	-10	4.5	113	3.1	-103	8.1	-164
12	-	-	-	-	-	-	0.7	-70
13	7.2	70	6.4	-62	6.0	-158	31.7	114
14	0.1	-8	0.2	112	0.2	-112	0.5	139
15	0.2	177	3.1	39	2.6	-178	24.4	-95
16	0.1	17	0.2	-113	0.1	105	0.7	47
17	1.8	50	4.6	-166	3.1	-4	9.4	-129
18	-	-	-	-	-	-	0.6	-113
19	0.6	-154	0.3	-123	0.9	21	1.7	-133
20	-	-	-	-	-	-	0.4	162
21	0.5	-67	0.5	132	0.5	-150	11.0	12
22	-	-	-	-	-	-	0.3	-74
23	0.5	-101	0.5	-23	0.6	141	8.4	23
24	-	-	-	-	-	-	0.5	85
25	0.4	10	-	-	0.4	-173	4.3	91
26	-	-	-	-	-	-	0.6	28
27	0.2	136	0.2	-52	0.2	151	2.3	-53
28	-	-	-	-	-	-	0.5	171
29	-	-	0.2	157	0.2	-64	1.0	93
30	-	-	-	-	-	-	0.2	-120
31	0.2	148	-	-	0.1	19	4.8	-131

주]  $I_{A1} = 566.4$  [Arms],  $I_{THD,A} = 33.7$  [%]  
 $I_{B1} = 516.0$  [Arms],  $I_{THD,B} = 37.8$  [%]  
 $I_{C1} = 514.7$  [Arms],  $I_{THD,C} = 33.5$  [%]  
 $I_{N1} = 33.8$  [Arms],  $I_{THD,N} = 255.5$  [%]

#### 4. 영상 전류 저감장치의 적용

영상 전류 저감장치는 상용화된 제품(ZED, Zero sequence harmonic currents Eliminating Device)을 종로타워 건물의 상업용 설비에 적용시켜 ZED 설치 후의 고조파를 측정하고 MATLAB으로 시뮬레이션 한 값과 비교한다.

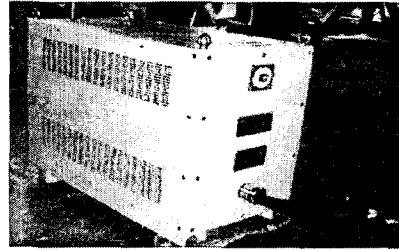


그림 8. 영상 고조파 저감 장치의 외관도  
Fig. 8. ZED

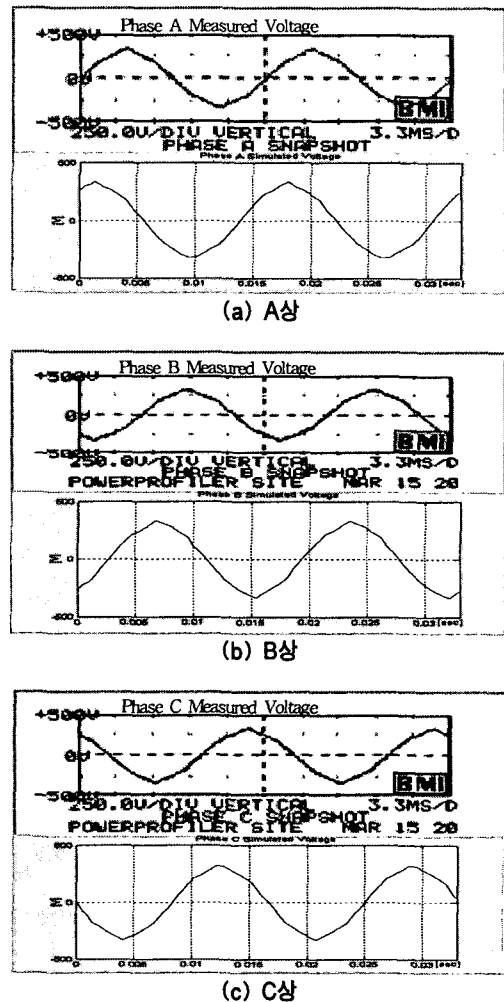


그림 9. ZED 설치후의 전압 파형  
Fig. 9. Voltage waveforms after ZED application

그림 8은 변압기 2차측에 설치한 것과 같은 ZED를 나타낸다. 사용된 ZED 사양은 3상, 380[V],

300[A], 60[Hz]이다. 그림 9은 ZED설치후의 전압파형으로 실측한 파형과 MATLAB으로 시뮬레이션한 파형을 나타낸다. 표 5는 수치로 요약한 것이다. 부하는 시시각각으로 변하고 또한 고조파 측정 장비로 ZED설치 전후의 고조파를 측정하는데 시간(약 10분)이 소요 되므로 전압의 크기와 전압 왜형율이 차이가 난다고 사료된다. 전압 왜형율은 ZED 설치후에 약간 감소 하였다. 설치후의 전력은 다음과 같다.

$$S_A = 123.6 + j48.43 \text{ [kVA]}$$

$$S_B = 108.2 + j3.35 \text{ [kVA]}$$

$$S_C = 107.4 + j42.09 \text{ [kVA]}$$

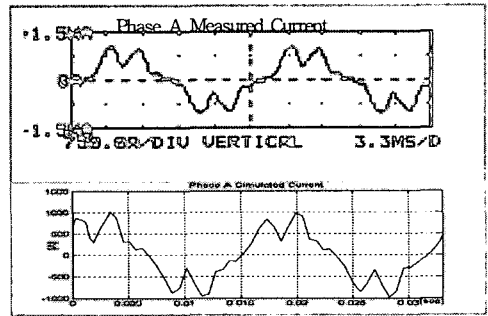
표 5. 전압 비교  
Table 5. Voltage comparisons

		ZED 설치전 실측	ZED 설치후 실측	ZED 설치후 시뮬레이션
A상	V <sub>A</sub> [Vrms]	222.2	222.1	221.7
	V <sub>THDA</sub> [%]	4.2	4.1	3.2
B상	V <sub>B</sub> [Vrms]	220.7	220.6	221.9
	V <sub>THDB</sub> [%]	4.2	4.0	2.4
C상	V <sub>C</sub> [Vrms]	220.8	220.3	220.8
	V <sub>THDC</sub> [%]	3.7	3.5	3.4

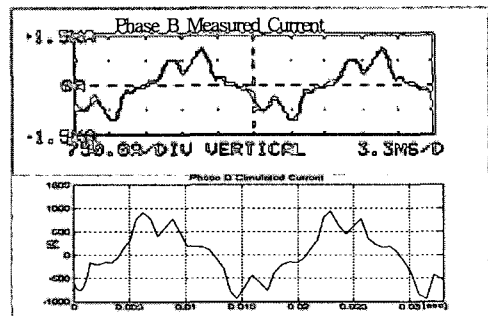
그림 10 ZED 설치후의 전류 파형으로 실측한 파형과 MATLAB 시뮬레이션 한 파형을 나타낸다. 표 6은 수치로 요약했다. 실측한 값과 시뮬레이션한 값과의 차이가 있는 것은 부하 변동과 분전반 주변에 연결된 중성선에 영상 고조파 전류가 유입된 것으로 판단된다. 영상 전류 저감장치는 이론적으로 영상 임피던스를 영으로 만들기 때문에 사례연구 시스템의 영상 전류뿐만 아니라 중성선에 연결된 다른 부하로 부터는 영상전류가 유입될 수 있다.

표 6. 전류 비교  
Table 6. Current comparisons

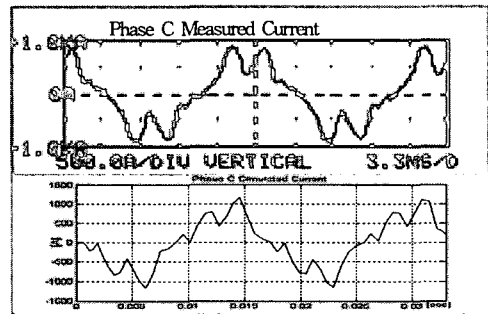
		ZED 설치전 실측	ZED 설치후 실측	ZED 설치후 시뮬레이션
A상	I <sub>A</sub> [Arms]	504.1	607.7	563.2
	I <sub>THDA</sub> [%]	33.7	32.6	36.2
B상	I <sub>B</sub> [Arms]	556.4	565.0	517.1
	I <sub>THDB</sub> [%]	37.8	37.4	37.9
C상	I <sub>C</sub> [Arms]	542.5	530.6	614.6
	I <sub>THDC</sub> [%]	33.5	33.5	36.7
N상	I <sub>N</sub> [Arms]	83.1	34.5	33.0
	I <sub>THDN</sub> [%]	255.5	801.6	43.8



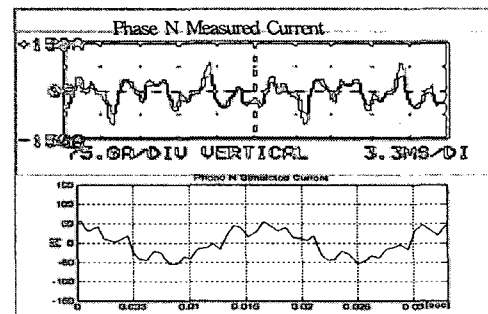
(a) A상



(b) B상



(c) C상



(d) N상

그림 10. ZED 설치후의 전류 파형  
Fig. 10. Current waveforms after ZED application

## 상업용 설비 부하의 중성선 영상전류 저감장치 분석 및 적용에 관한 연구

영상전류 저감장치를 상업용 설비 부하에 적용한 결과 설치전 중성선의 전류 83[A]가 설치후에는 35[A](시물레이션은 33[A])로 감소하였고, 전류 왜형율은 설치전 256[%]에서 설치후에는 802[%](시물레이션은 44[%])로 변화되었다.

### 5. 결 론

우리나라 배전시스템은 3상 4선식을 채택하고 있으며 단상 부하와 3상 부하가 혼합되어 중성선에 불평형 전류가 흐르고 조명부하와 같은 비선형 부하로 인한 고조파 발생으로 중성선에 더 많은 고조파 전류가 흐른다. 사례연구 시스템의 중성선 전류는 83.1[A]로서 선전류의 불평형율 5.3[%]로 인한 불평형 전류와 비선형 부하의 고조파 함유율 255.5[%]로 인한 고조파 전류로 구성되어 있다. 중성선에는 예측한대로 제 3고조파가 190.8[%]이나 포함되어 있었다.

중성선의 고조파 전류를 저감시키는 장치로 중성선 영상 전류 저감장치가 널리 사용되고 있다. 지그재그 변압기를 이용하여 영상 임피던스를 작게하여 영상분(3배수 고조파) 전류를 상쇄시키는 원리이다. 상용화되어 현장에서 쓸 수 있는 영상 전류 저감장치를 상업용 설비에 적용하여 고조파 저감 효과를 실측과 시물레이션으로 알아보았다. 전압은 필터 설치전 평균 왜형율이 4.0[%]에서 필터 설치후에는 평균 왜형율이 3.9[%]로 큰 변화는 없었다. 선로 전류는 필터 설치전 평균 왜형율이 35[%]에서 필터 설치후에는 평균왜형율이 34[%]로 다소 저감되었다. 중성선 전류는 필터 설치전에는 83.1[A]에서 설치후에는 34.5[A]로 대폭 감소하였고 전류 왜형율은 설치전 255.5[%]에서 설치후는 43.8[%](시물레이션)로 저감 되었다. 다른 비선형 부하에 영상 전류 저감장치를 설치하지 않고도 MATLAB 시물레이션으로 그 효과를 예측할 수 있다고 사료된다.

향후 부하 변동이 없는 고조파 발생장치에 영상 전류 저감장치를 적용하여 실측과 컴퓨터 시물레이션 결과를 검증할 계획이다. 또한 중성선 전류와 접지 임피던스와의 관계를 정립하여 접지 임피던스 효과를 알아보고자 한다.

이 논문은 2004학년도 홍익대학교 교내 연구비에 의하여 지원되었음.

### References

- (1) T.M.Gruzs, "A Survey of Neutral Currents in Three-phase Computer Power Systems", IEEE Transaction on Industry Applications, July August 1990.
- (2) J. C. Balda and et. al, "Measurements of Neutral Currents and Voltages on a Distribution Feeder", IEEE Transaction on Power Delivery, October 1997.
- (3) T. Key and J. Lai, "Analysis of Harmonic Mitigation Methods for Building Wiring Systems", IEEE Transactions on Power Systems, August 1998.
- (4) G. Ferguson, "Zero Phase Sequence Current Filter Apparatus and Method for Connection to the Load End of Six or Four-wire Branch Circuits", United States Patent p/n 6,043,569, March 2000.
- (5) L. H. Beverly st al, "Method and Apparatus for Reducing the Harmonic Currents in AC Distribution Networks", US Patent P/N 5,576,942, Nov. 1996.
- (6) "중성선 영상 고조파 저감장치 사양서", (주)피에스디테크, 2003.
- (7) "MATLAB User's manual", Math Works, 2002.
- (8) "3030A Profiler", Dranetz BMI, 2000.

### ◇ 저자소개 ◇

#### 김경철 (金慶哲)

1954년 1월 20일생. 1977년 홍익대학교 전기공학과 졸업. 1977~1982년 국방과학연구소 연구원. 1982~1984년 NMSU 전기공학과 석사. 1984~1988년 UTA 전기공학과 박사. 1988~1991년 한국 전기연구소 선임 연구원. 1991~현재 홍익대학교 전자전기컴퓨터공학부 교수.

#### 이일무 (李一茂)

1971년 7월 16일생. 2000년 홍익대학교 전기공학과 졸업. 2002년 동 대학원 전기공학과 졸업(석사). 2001~현재 (주)피에스디테크 연구원. 2003~현재 동 대학원 박사 과정.

#### 백승헌 (白承鉉)

1975년 7월 13일생. 2002년 홍익대학교 전기공학과 졸업. 2003년~현재 홍익대학교 대학원 석사과정.