Journal of the Korean Institute of Illuminating and Electrical Installation Engineers Vol. 17, No.1, pp. 103~111 January 2003 논문 17-1-15

현장시험에 의한 중성선 고조파 전류 측정, 모델링 및 수동필터 적용에 관한 연구

(A Study on the Measurements, Moldeling, and Passive Filter Application of Neutral Harmonic Currents by Field Tests)

김경철* · 강윤모 · 이일무

(Kyung - Chul Kim · Yun - Mo Kang · Il - Moo Lee)

요 약

교육용 건물에는 개인용 컴퓨터와 같은 비선형 부하가 증가하여, 중성선에는 많은 고조파 전류가 흐른다. 3상 4선식 배전 계통을 채용하는 중성선에 과다한 고조파 전류가 흐르면 중성선 도체 과열과 보호 시스템의 오동작등 많은 고조파 장해를 일으킨다. 본 논문에서는 현장에서 실측한 고조파 전류와 전압으로 고조파 해석용 3상 등가회로를 구성하였다. 실측한 값과 MATLAB으로 시뮬레이션한 값을 수치와 그래프로 비교 검토 하였다. 또한 중성선 고조파 전류 저감 대책으로 동조 수동 필터를 사례연구 시스템에 적용하여 고조파 저감 효과도 알아 보았다.

Abstract

With the proliferation of nonlinear loads such as personal computer in an educational building, high neutral harmonic currents have been observed. High neutral currents in three-phase four wire distribution power systems can cause lots of harmonic problems such as overloaded neutral conductors and malfunction of protective equipment. On-site measurements of harmonic currents and voltages were made and the corresponding equivalent circuits was developed. The circuit model under study was simulated numerically and graphically through the use of the software MATLAB. Simulation results verifying the effects of a single-tuned passive filter for the neutral harmonic current reduction are presented.

Key Words : Neutral Hamonic Currents, Total Harmonic Distortion, Equivalent Circuit, Single-tuned Passive Filter

1. 서 론

교육용 건물에는 개인용 컴퓨터, 레이저 프린터, 형광등, 반도체 소자의 스위칭을 이용하는 전자 장비등 비선형 부하가 많이 쓰이고 있다. 이들 비선형 부하는 3상 4선식 배전 시스템을 채용하는 중성선에 고조파 전류를 발생시키는 주요 원인이 되고 있다[1][2][3].

과다한 중성선 전류는 중성선 도체의 과열, 배전 변압기의 성능저하, 전압의 왜곡, 통신선 잡음, 전기전자 장비의 오동작등 고조파 장해를 일으키게 된다.

3상 4선식 배전 시스템에서 중성선 전류는 3상 전

* 주저자 : 홍익대학교 전기공학과 교수
Tel : 041-860-2568, Fax : 041-863-7605
E-mail : yangjier@wow.hongik.ac.kr
접수일자 : 2002년11월18일
1차심사 : 2002년11월20일
심사완료 : 2003년12월13일

류의 벡터 합으로 된다. 3상 평형 선형 부하에서는 선형 정현파 전류가 위상각이 abc 상순으로 120도가 되므로 벡터 합을 하면 중성선에는 전류가 흐르지 않게 된다. 대부분의 3상 배전 시스템은 단상으로 부하에 전력을 공급하므로, 불평형 부하로 인한 중성선 전류가 다소 흐르게 된다.

비선형 부하는 고조파를 발생기켜, 상전류는 비정현파가 되어 3상 전류의 벡터합은 영이 되지 않는다. 특히 3,6,9,12등 3배수 고조파는 중성선에서는 동위상이 되어 더 큰 중성선 고조파 전류를 흐르게 만든다.

본 논문에서는 교육용 건물에서 널리 사용되고 있는 개인용 컴퓨터와 같은 비선형 부하가 중성선 고조파 전류를 얼마나 흘려 보내는지 실측을 통하여 데이터를 얻고, 실측한 데이터를 근거로 고조파 해석용 등가 회로를 모델링 하고자 한다. MATLAB을 이용한 컴퓨터 시뮬레이션으로 실측한 데이터와 비교하여 개발된 등가회로를 검증 한다.

중성선에 흐르는 고조파 전류를 저감 시키는 일반적인 방법으로는 고조파 필터를 사용한다.개발된 등가회로 모델에 동조 수동필터를 적용하여 고조파 저감 효과를 알아보고자 한다.

2. 고조파 측정

고조파 전류 및 전압 측정은 홍익대 조치원 캠퍼스의 D동 건물에서 여러차례 수행 하였다. 그림 1은 사례연구 시스템의 단선도이다. 3번 변압기는 6.6[kV] 공급전압을 2차측에 380 - 220[V] 전압으로 낮추어 연구실, 실험실, 기타 여러 부하에 전력을 공급하고 있다.

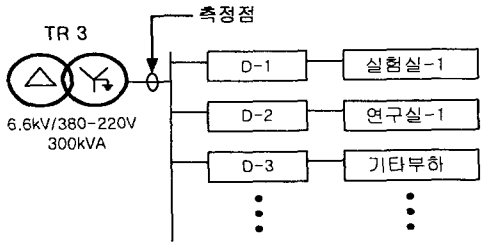


그림 1. 사례 연구 배전 시스템
Fig. 1. Single-line Diagram of the Distribution System Under Study

고조파 측정 장비는 BMI모델 3030[A]를 사용하였다[4]. 그림2에서와 같이 BMI모델 3030A는 노트북과 연결시켜 50차 고조파까지의 전류(3000[A]), 전압(120-240[V] PT사용) 및 전력을 측정하여 모니터에서 확인하고 컴퓨터에 데이터를 저장할 수 있다.

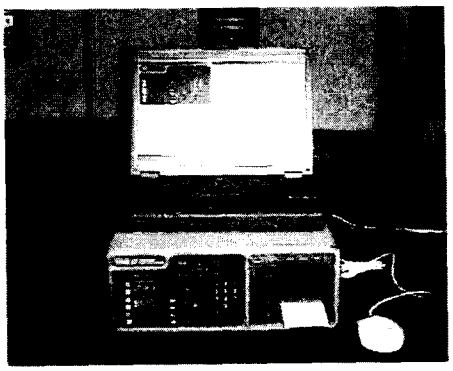


그림 2. 측정 장비
Fig. 2. Measurement Equipment

고조파 평가기준은 종합 왜형률(Total Harmonic Distortion, THD) 로 나타낼 수 있다.

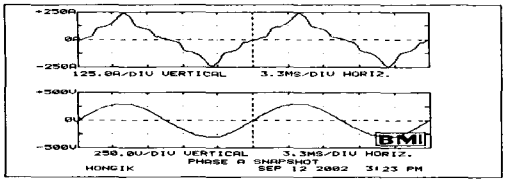
$$V_{THD} = \frac{\sqrt{\sum_{n=2}^{\infty} V_n^2}}{V_1} \times 100[\%] \quad (1)$$

$$I_{THD} = \frac{\sqrt{\sum_{n=2}^{\infty} I_n^2}}{I_1} \times 100[\%] \quad (2)$$

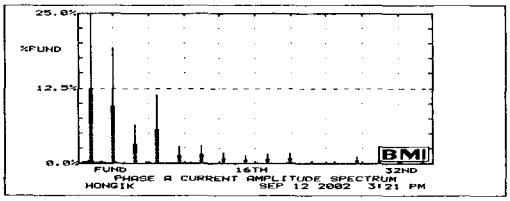
여기서, V_1, I_1은 기본파(60Hz)의 전압과 전류이다.

부하는 시시각각으로 변화하므로 어느 한 순간의 전압과 전류의 파형을 분석하여 고조파 함유율, 중성선 전류 계산, 전력 계산, 중성선과 대지(여기서는 외함)간의 전압을 계산한 측정값을 이용한다.

그림 3(a)는 A상의 전류 및 전압 파형으로 2사이클(33msec) 동안 측정된 값이고, 그림 3(b)는 전류 스펙트럼이다. 그림 4은 B상, 그림 5는 C상, 그리고 그림 6는 중성선의 전류 및 전압 파형으로 측정장비 내부에서 프로그램에 의해 계산된 값이다.

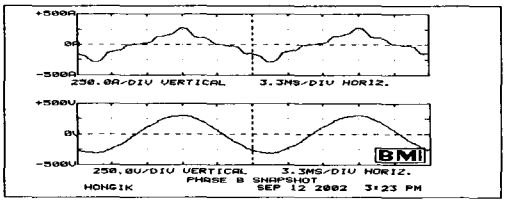


(a) A상 전류 및 전압파형

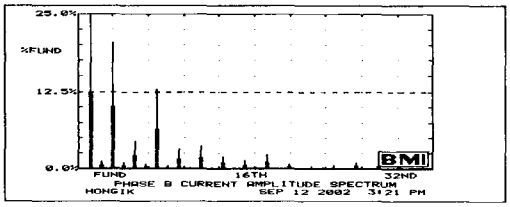


(b) A상 전류 스펙트럼

그림 3. A상 전류 및 전압 파형
Fig. 3. Current and Voltage Waveforms for Phase A

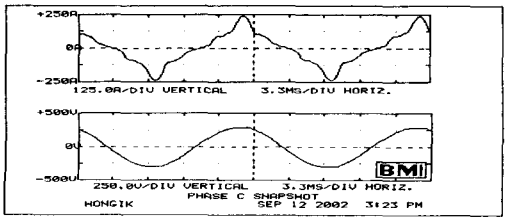


(a) B상 전류 및 전압파형

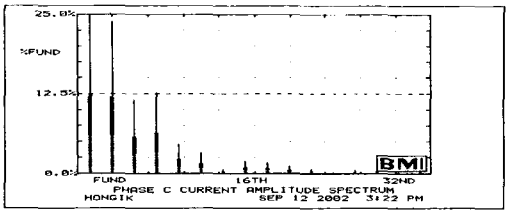


(b) B상 전류 스펙트럼

그림 4. B상 전류 및 전압 파형
Fig. 4. Current and Voltage Waveforms for Phase B

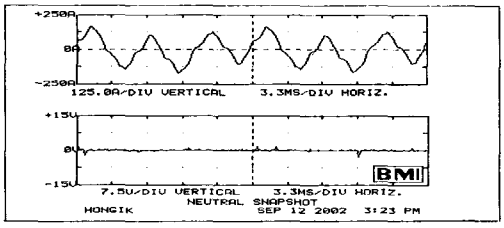


(a) C상 전류 및 전압파형

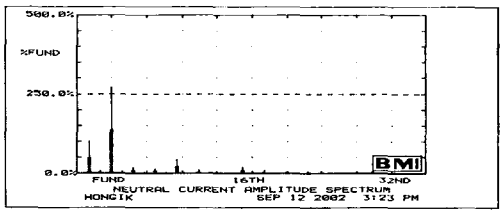


(b) C상 전류 스펙트럼

그림 5. C상의 전류 및 전압 파형
Fig. 5. Current and Voltage Waveforms for Phase C



(a) 중성선 전류 및 전압파형



(b) 중성선 전류 스펙트럼

그림 6. 중성선 전류 및 전압 파형
Fig. 6. Current and Voltage Waveforms for Neutral Line

변압기 2차측의 공급전압은 전압 왜형률이 2[%] 이내로 거의 정현파이다. 고조차 함유율 분석은 표 1에 나타내었다. 2,4,…등의 짝수파 고조파 함유율은 홀수파 고조파 함유율에 비해 수치가 작아 생략하고, 15 고조파 이상의 왜형률도 작은 비율이므로 생략하였다. VA1에서 숫자 1은 기본파를 의미한다. 측정된 실효치 상전압은 다음과 같다.

$$V_{AN} = 217.6\angle 0^\circ \quad [V]$$
$$V_{BN} = 219.2\angle -120^\circ \quad [V]$$
$$V_{CN} = 217.3\angle 120^\circ \quad [V]$$
$$V_{NG} = 0.3\angle -1^\circ \quad [V]$$

표 1. 고조파 전압 측정
Table 1. Harmonic Spectrum of Voltage Waveform

고조파 차수	A상		B상		C상	
	크기(%)	위상(°)	크기(%)	위상(°)	크기(%)	위상(°)
기본파	100.0	0	100.0	-120	100.0	120
3	1.2	63	1.3	102	1.2	80
5	0.2	161	0.3	-84	0.5	74
7	0.8	64	1.2	-75	0.7	170
9	0.4	-124	0.6	-151	0.6	-147
11	0.7	-63	0.9	17	0.8	170
13	0.1	-159	0.3	44	0.1	-167
15	0.4	172	0.2	121	0.4	155

주] V_{A1} = 217.6∠0° [Vrms], $V_{THD,A}$ = 1.9 [%]
V_{B1} = 219.2∠-120° [Vrms], $V_{THD,B}$ = 2.2 [%]
V_{C1} = 217.2∠120° [Vrms], $V_{THD,C}$ = 1.8 [%]

전류 파형은 비선형 부하로 인하여 고조파가 많이 포함되어 있음을 그림 3부터 그림 6까지에서 알 수 있다. 표 2는 고조파 전류 함유율 분석표이다. 예측한 대로 중성선에는 제 3고조파가 273.1[%]이나 포함되어 있었다. 측정된 실효치 전류는 다음과 같다.

$$I_A = 129.1\angle -30^\circ \quad [A]$$
$$I_B = 154.2\angle -121^\circ \quad [A]$$
$$I_C = 120.6\angle 114^\circ \quad [A]$$
$$I_N = 89.0\angle 95^\circ \quad [A]$$

표 2. 고조파 전류 측정
Table 2. Harmonic Spectrum of Current Waveform

고조파 차수	A상		B상		C상		N상(중성선)	
	크기(%)	위상(°)	크기(%)	위상(°)	크기(%)	위상(°)	크기(%)	위상(°)
기본파	100.0	-3	100.0	-121	100.0	114	100	96
3	19.2	-178	20.5	178	24	168	273.1	-7
5	6.3	-25	4.6	83	11.5	-157	16.3	30
7	11.3	164	13.0	29	12.6	-93	12.6	165
9	2.8	-33	3.2	-46	4.4	-60	43.6	121
11	2.9	24	3.6	113	3.1	-87	10.3	-142
13	1.8	-32	1.9	175	0.6	60	3.4	16
15	1.3	-91	1.2	-130	1.9	-99	17.0	55
17	1.5	141	2.2	-142	1.7	-5	6.3	-10
19	1.6	176	0.7	8	1.1	-64	1.3	25
21	0.4	-4	0.3	-78	0.6	-38	4.6	117
23	0.2	-100	0.5	-22	0.2	-122	2.5	97

주] I_{A1} = 126.1∠-3° [Arms], $I_{THD,A}$ = 23.8 [%]
I_{B1} = 149.4∠-121° [Arms], $I_{THD,B}$ = 25.4 [%]
I_{C1} = 115.5∠114° [Arms], $I_{THD,C}$ = 30.0 [%]
I_{N1} = 29.2∠96° [Arms], $I_{THD,N}$ = 278.5 [%]

측정 장비가 1주기 동안 계산한 전력을 요약하면 다음과 같다.

$$S_{AN} = 27.26 + j1.382 \quad [kVA]$$
$$S_{BN} = 32.80 + j0.124 \quad [kVA]$$
$$S_{CN} = 24.98 + j2.521 \quad [kVA]$$

그림 7은 A상의 전력 파형으로 2사이클(33msen) 동안 측정된 값이다. 그림 8은 B상, 그림 9은 C상의 전력 파형이다.

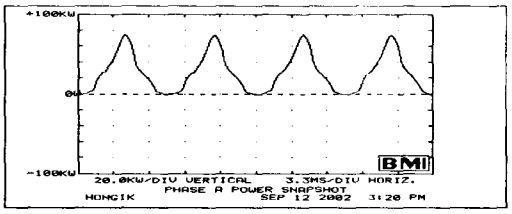


그림 7. A상 전력 파형
Fig. 7. Power Waveform for Phase A

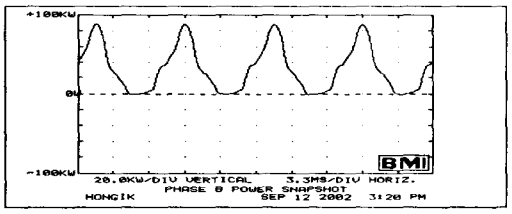


그림 8. B상 전력 파형
Fig. 8. Power Waveform for Phase B

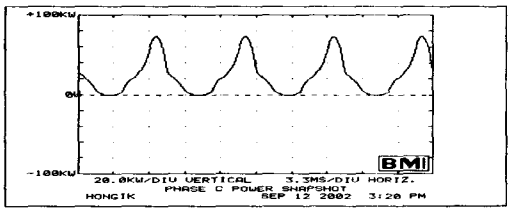


그림 9. C상 전력 파형
Fig. 9. Power Waveform for Phase C

3. 비선형부하 모델링

고조파 해석용 등가 회로를 구성 하려면, 비선형 부하의 고조파 전압과 측정이 우선 되어야 한다. 측정점

에서 본 전압원은 기본파 전압과 고조파 전압의 합으로 나타낼 수 있다[5].

$$\begin{aligned} V_{AN} &= V_{A1} + V_{Ah} \\ V_{BN} &= V_{B1} + V_{Bh} \\ V_{CN} &= V_{C1} + V_{Ch} \end{aligned} \quad (3)$$

여기서 V_{A1}은 A상의 기본파 전압이고, VAh는 A상의 고조파 전압으로 h는 2,3,…이다.

IEEE Std. 519-1992에 따르면 비선형 부하는 기본파 전류에 의한 임피던스 부하와 고조파 전류원의 합으로 나타낼 수가 있다[6].

$$\begin{aligned} I_A &= I_{A1} + I_{Ah} \\ I_B &= I_{B1} + I_{Bh} \\ I_C &= I_{C1} + I_{Ch} \end{aligned} \quad (4)$$

여기서 I_{A1}은 A상의 기본파 전류로 부하 A의 임피던스로 등가 변환된다. I_{Ah}는 A상의 고조파 전류로 h는 2,3,…이다.

즉,

$$Z_A = R_A + jX_A = \frac{|V_{AN}|^2 (P_A + jQ_A)}{P_A^2 + Q_A^2} \quad [\Omega] \quad (5)$$

여기서 P_A는 A상의 유효전력[W], Q_A는 A상의 무효전력[VAR]이다. V_{AN}은 A상의 정격전압[V]을 나타낸다.

부하의 중성점N′와 중성점N 사이에 접지저항 RNG는 측정된 대지전압 VNG[V]과 중성선 전류 I_N[A]에서 구한다.

$$R_{NG} = \frac{V_{NG}}{I_N} \quad [\Omega] \quad (6)$$

전원의 중성점과 대지간의 접지저항 R_G는 건물의 접지저항값(여기서는 4.4[Ω])을 적용하였다.

따라서 측정점에서 본 비선형 부하의 3상 등가회로는 그림 10과 같이 유도된다.

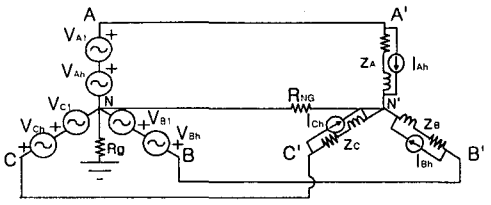
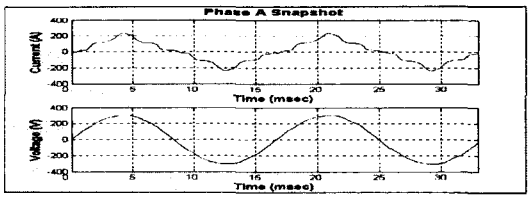


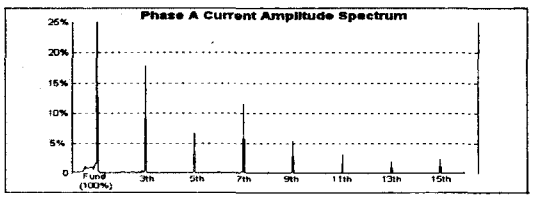
그림 10. 3상 등가 회로
Fig. 10. Three-Phase Equivalent Circuit

고조파 해석용 3상 등가 회로(그림 10)에 실측한 데이터를 적용하여 MATLAB[7]을 사용한 시뮬레이션 결과를 요약하기로 한다.

그림 11(a)는 A상의 전류 및 전압파형으로 시뮬레이션 시간은 처음 2주기(0~33msec)동안이고, 그림 11(b)는 A상의 전류 스펙트럼이다. 그림 12는 B상, 그림 13은 C상, 그리고 그림 14는 중성선의 전류 및 전압 파형을 나타낸다.

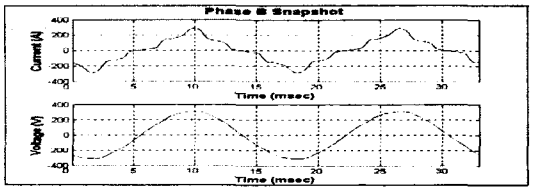


(a) A상 전류 및 전압파형

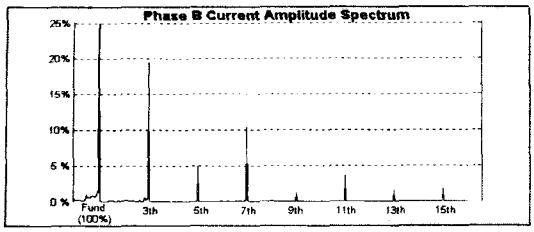


(b) A상 전류 스펙트럼

그림 11. A상 전류 및 전압 파형
Fig. 11. Simulated Current and Voltage Waveforms for PhaseA

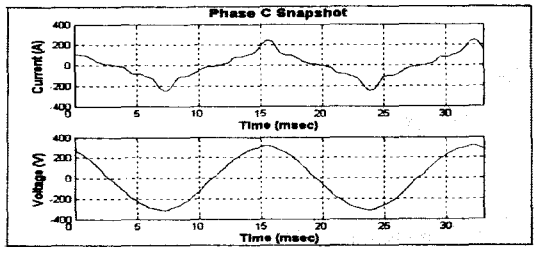


(a) B상 전류 및 전압파형

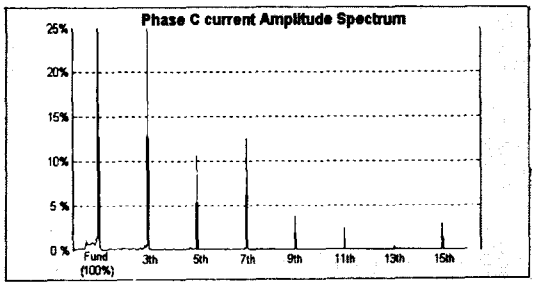


(b) B상 전류 스펙트럼

그림 12. B상 전류 및 전압 파형
Fig. 12. Simulated Current and Voltage Waveforms for PhaseB

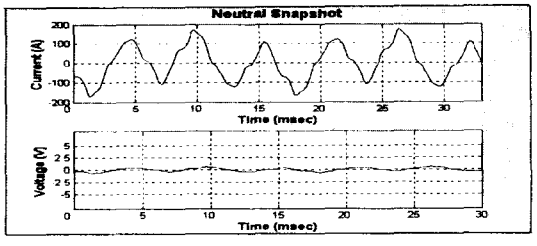


(a) C상 전류 및 전압파형

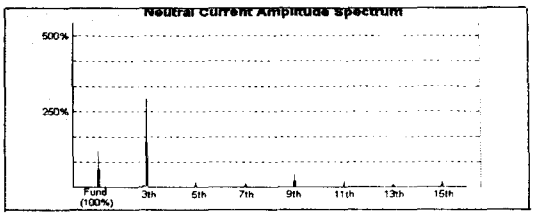


(b) C상 전류 스펙트럼

그림 13. C상 전류 및 전압 파형
Fig. 13. Simulated Current and Voltage Waveforms for PhaseC



(a) 중성선 전류 및 전압파형



(b) 중성선 전류 스펙트럼

그림 14. 중성선 전류 및 전압 파형
Fig. 14. Simulated Current and Voltage Waveforms for NeutralLine

그림 15는 A상의 전력 파형으로 시뮬레이션 시간은 처음 2주기(0~33msec)동안이다. 그림 16은 B상, 그림 17은 C상의 전력 파형을 나타낸다.

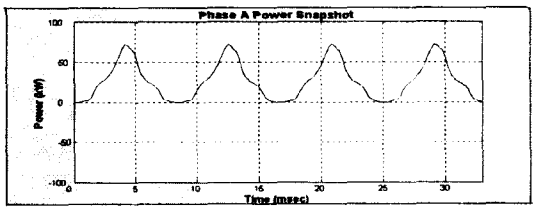


그림 15. A상 전력 파형
Fig. 15. Simulated Power Waveforms for Phase A

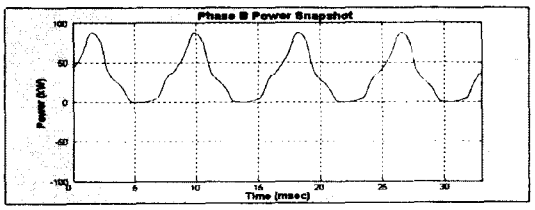


그림 16. B상 전력 파형
Fig. 16. Simulated Power Waveforms for Phase B

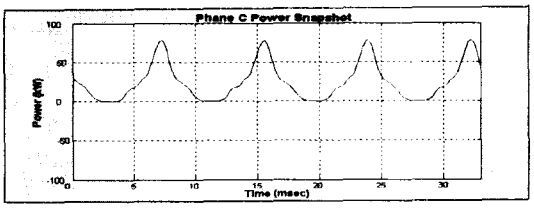


그림 17. C상 전력 파형
Fig. 17. Simulated Power Waveforms for Phase C

표 3은 전압의 측정치와 시뮬레이션값을 비교한 것

이다. 전압이 약간 차이가 나는 것은 등가 모델에 고조파 전원을 왜형률이 1[%]가 넘는 것만 고려했기 때문이다.

표 4는 전류의 측정치와 시뮬레이션 값을 비교한 것이다. 전류 왜형률이 차이가 나는 이유는 고조파 전원을 왜형율이 1[%]가 넘는 것만 고려하고, 부하 임피던스를 정격전압(220[V])에서 계산했기 때문이다.

표 5는 전력의 측정치와 시뮬레이션 값을 비교한 것이다.

표 3. 전압 비교
Table 3. Voltage Comparisions between Measurement and Simulation

		측 정	시뮬레이션
A상	V_A [V_{rms}]	217.6	217.6
	$V_{THD,A}$ [%]	1.9	1.60
B상	V_B [V_{rms}]	219.2	219.3
	$V_{THD,B}$ [%]	2.2	2.64
C상	V_C [V_{rms}]	217.3	217.3
	$V_{THD,C}$ [%]	1.8	1.71

표 4. 전류 비교
Table 4. Current Comparisons between Measurement and Simulation

		측 정	시뮬레이션
A상	I_A [A_{rms}]	129.1	126.1
	$I_{THD,A}$ [%]	23.8	23.81
B상	I_B [A_{rms}]	154.2	153.3
	$I_{THD,B}$ [%]	25.4	26.38
C상	I_C [A_{rms}]	120.6	118.4
	$I_{THD,C}$ [%]	30.0	31.56
N상	I_N [A_{rms}]	89.0	89.7
	$I_{THD,N}$ [%]	275.8	265.4

표 5. 전력 비교
Table 5. Power Comparisons between Measurement and Simulation

		측정	시뮬레이션
A상	P_{AN} [kW]	27.26	26.64
	Q_{AN} [kVAR]	1.382	1.413
B상	P_{BN} [kW]	32.80	32.56
	Q_{BN} [kVAR]	0.124	0.252
C상	P_{CN} [kW]	24.98	24.48
	Q_{CN} [kVAR]	2.521	2.524

4. 수동필터 적용

고조차 저감 기술로 비교적 가격이 저렴하고 설치하기 쉬운 동조 수동필터(그림 18)를 적용하여 중성선에 흐르는 고조파 전류를 저감 시키는 효과를 알아보기로 하자[8].

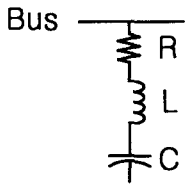


그림 18. 동조수동 필터
Fig. 18. Single-tuned Passive Filter

표2에서 상전류의 고조파 성분을 보면, 주로 제 3고조파와 제 7고조파가 많이 포함되어 있으므로, 제 3고조파 동조 수동필터와 제 7고조파 동조 수동필터를 설계하여 설치하기로 한다.

제 3고조파 동조 수동필터의 제원은, 먼저 저항 R=0.001 [Ω], 인덕턴스 X_L =0.5 [Ω]으로 정하고 캐패시턴스 값을 구하면 된다.

즉,

$$L = \frac{X_L}{2\pi f} = \frac{0.5}{2\times 3.14\times 60} = 1.3269\times 10^{-3}[H]$$

$$X_C = h^2 X_L = 3^2\times 0.5 = 4.5[\Omega]$$

$$C = \frac{1}{2\pi f X_C} = \frac{1}{2\times 3.14\times 60\times 4.5} = 5.8946\times 10^{-4}[F]$$

마찬가지로, 제 7고조파 동조 수동필터의 정수 값을 구한다.

$$R = 0.001[\Omega]$$

$$X_L = 0.5[\Omega]$$

$$L = \frac{X_L}{2\pi f} = \frac{0.5}{2\times 3.14\times 60} = 1.3269\times 10^{-3}[H]$$

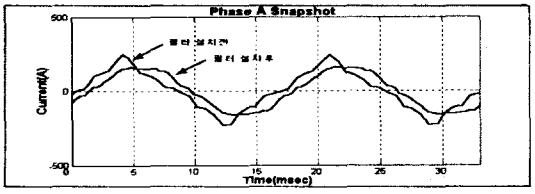
$$X_C = h^2 X_L = 7^2\times 0.5 = 24.5[\Omega]$$

$$C = \frac{1}{2\pi f X_C} = \frac{1}{2\times 3.14\times 60\times 24.5} = 1.0827\times 10^{-4}[F]$$

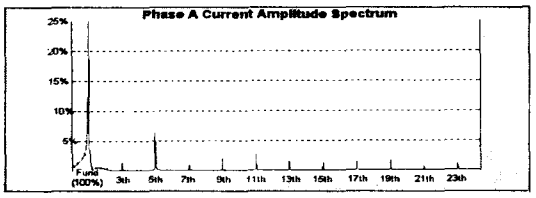
제 3고조파와 제 7고조파 동조 수동필터를 A,B,C

상에 설치하여 시뮬레이션한 결과를 요약하면 다음과 같다.

그림 19(a)는 A상의 필터 설치 전후의 전류 파형이고, 그림 19(b)는 A상의 필터 설치 후의 전류 스펙트럼이다. 그림 20은 B상, 그림 21은 C상, 그리고 그림 22는 중성선의 필터 설치 전후의 전류 파형과 스펙트럼을 나타낸다.

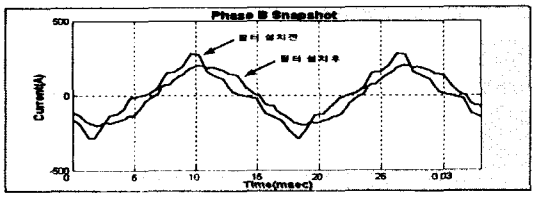


(a) A상의 필터 설치 전후의 전류파형

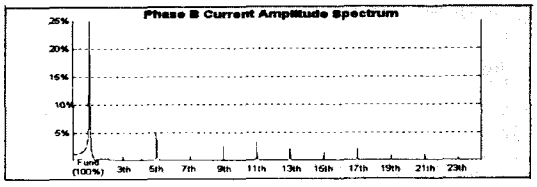


(b) A상의 필터 설치 후의 전류 스펙트럼

그림 19. A상의 전류파형 및 스펙트럼
Fig. 19. Current Waveforms and Spectrum for Phase A

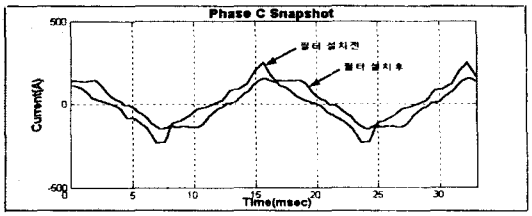


(a) B상의 필터 설치 전후의 전류파형

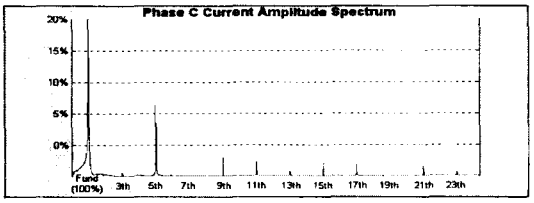


(b) B상의 필터 설치 후의 전류 스펙트럼

그림 20. B상의 전류파형 및 스펙트럼
Fig. 20. Current Waveforms and Spectrum for Phase B

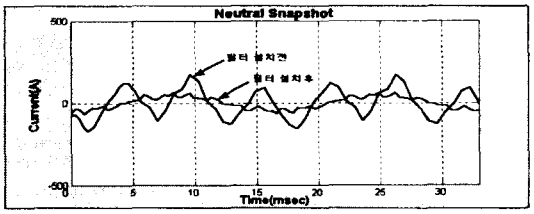


(a) C상의 필터 설치 전후의 전류파형

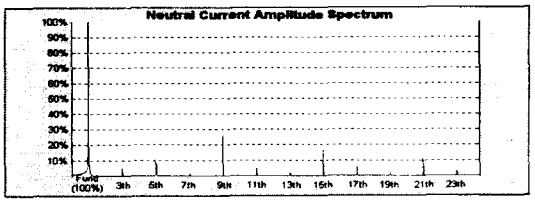


(b) C상의 필터 설치 후의 전류 스펙트럼

그림 21. C상의 전류파형 및 스펙트럼
Fig. 21. Current Waveforms and Spectrum for Phase C



(a) 중성선의 필터 설치 전후의 전류파형



(b) 중성선의 필터 설치 후의 전류 스펙트럼

그림 22. 중성선의 전류파형 및 스펙트럼
Fig. 22. Current Waveforms and Spectrum for Neutral Line

표 6은 동조 수동필터의 설치 전후의 전류와 전류 왜형율 비교표이다. 중성선의 경우 제 3고조파와 제 7고조파 동조 수동필터를 설치하면 중성선 전류는 설치전 89.7[A]에서 설치후 36[A]로 감소하고, 전류 왜형율은 265.4[%]에서 29[%]로 대폭 저감 되었다.

표 6. 전류 및 전류 왜형율
Table 6. Current and Total Harmonics Distortion

		필터 설치전	3rd필터 설치후	7th필터 설치후	3rd+7th 필터 설치후
A상	I_A [A_{rms}]	126.1	118.9	128.8	115.3
	$I_{THD,A}$ [%]	23.81	11.3	19.8	7.3
B상	I_B [A_{rms}]	153.3	141.5	152.3	137.7
	$I_{THD,B}$ [%]	26.38	14.7	21.3	7.1
C상	I_C [A_{rms}]	118.4	109.8	119.8	106.5
	$I_{THD,C}$ [%]	31.56	14.5	25.2	12.3
중성선	I_N [A_{rms}]	89.7	36.1	85.8	35.8
	$I_{THD,N}$ [%]	265.4	40.0	275.9	29.1

4. 결 론

교육용 건물에는 개인용 컴퓨터를 비롯한 비선형 부하가 많이 사용되고 있다. 일반적으로 3상 4선식 배전시스템을 채용하고 있으며, 단상 부하와 3상 부하가 혼합되어 중성선에 불평형 전류가 흐르고, 비선형 부하로 인한 고조파 전류 발생으로 중성선에 더 많은 고조파 전류가 흐르게 된다. 과다한 중성선 전류는 중성선 도체의 과열등 여러 가지 고조파 장해를 일으키므로, 중성선 고조파 전류에 대한 해석이 요구된다.

고조파 측정은 BMI 모델 3030A를 사용하여, 홍익대 조치원 캠퍼스 D동 건물의 3번 변압기 2차측에서 여러번 계측하였다. 측정한 고조파 전류, 전압, 전력은 고조파 해석용 3상 등가 회로를 구성하는데 필요한 데이터로 이용하였다. 중성선 전류는 89 [A]로서 선전류의 불평형율 13 [%]로 인한 불평형 전류와 비선형 부하의 고조파 함유율 279 [%]로 인한 고조파 전류로 구성되어 있다. 중성선에는 예측한대로 제 3 고조파가 273 [%]이나 포함되어 있었다.

고조파 해석용 3상 등가회로는 기본파의 전압원과 고조파 전압원을 직렬로 연결하고, 비선형 부하는 측정된 전압과 전력으로 기본파 성분의 선형 임피던스 부하와 고조파 전류원을 병렬로 연결하여 구성 하였다. MATLAB을 사용한 시뮬레이션으로 만족할 만한 결과를 얻을 수 있었다.

개발된 등가 회로에 고조파 저감 장치로 널리 쓰이고 있는 동조 수동필터를 설계 설치하여 중성선에 흐르는 고조파 전류 저감 효과를 검증 하였다. 시뮬레이션 결과로 중성선에는 필터 설치전 중성선 전류 89.7[A]에서 필터 설치후에는 36[A]로 감소하고, 전류 왜형율도 265.4[%]에서 29[%]으로 저감 되었다.

향후 접지 저항과 중성선 고조파 전류와의 관계를 정립하여 접지 저항 효과를 알아보고자 한다. 또한 중성선 고조파 전류 저감장치의 모델링을 통하여 고조파 저감 효과를 검증할 계획이다.

References

[1] A. C. Liew, "Excessive Neutral Currents in Three-Phase Fluorescent Lighting Circuits", IEEE Transactions on Industry Applications, July/August 1989.

[2] J. C. Balda and et al, "Measurements of Neutral Current and Voltages on a Distribution Feeder", IEEE Transactions on Power Delivery, October 1997.

[3] T. M. Gruzs, "A Survey of Neutral Currents in Three-Phase Computer Power Systems", IEEE Transactions on Industry Applications, Jury/August 1990.

[4] "3030A Profiler", DRANETZ BMI, 2000.

[5] L. Jiao and et al, "Modeling the Power Quality Characteristics of Computer Loads", Proceedings of the 1999 IEEE Canadian Conference on Electrical and Computer Engineering, May 9-12 1999.

[6] IEEE Std. 519-1992, "IEEE Recommended Practices and Requirements for Harmonic Contal in Electrical Power Systems", IEEE Inc., April 1993.

[7] "MATLAB User's manual", Math Works, 2000

[8] EDSA User Guide, "Electrical Power System Harmonics Analysis", EDSA Micro Co., 2002.

◇저자소개◇

김 경 철(金慶哲)
1954년 1월 20일생. 1977년 홍익대학교 전기공학과 졸업. 1977~1982 국방과학연구소 연구원. 1982~1984 NMSU 전기공학과 석사. 1984~1988 UTA 전기공학과 박사. 1988~1991 한국전기연구소 선임연구원. 1991~현재 홍익대학교 전자전기컴퓨터공학부 부교수.

강 윤 모(姜倫摸)
1977년 2월 26일생. 2002년 홍익대학교 전기공학과졸업. 2002년~현재 홍익대학교 대학원 석사과정.

이 일 무(李一茂)
1971년 7월 16일생.2000년 홍익대학교 전기공학과졸업. 2002년 동 대학원 전기공학과 졸업(석사). 2001~현재 (주)피에스디텍 연구원. 2003~현재 동 대학원 박사과정.