

사무용 빌딩에서의 전압 및 전류파형 왜곡특성 분석

(Analysis of Volatage and Current Waveform Distortion Characteristics at Office Buildings)

유재근* · 이상익 · 전정채 · 정종욱 · 임용배

(Jae-Geun Yoo · Sang-Ick Lee · Jeong-Chay Jeon · Jong-Wook Jeong · Young-Bae Lim)

요 약

사무용 빌딩의 비선형 전자부하에 기인한 전압 및 전류파형의 왜곡은 중성선의 과열, 변압기 손실, 누전차단기 오동작 등을 야기 시킨다. 본 논문에서는 사무용 빌딩에서의 전압 및 전류 고조파의 크기, 전압 및 전류 파고율(Crest Factor : CF), 전압 및 전류 불평형 등을 비교함으로써 파형왜곡 특성을 분석하였다. 분석 결과, 고조파에 의한 상 및 중성선에서의 심각한 파형 왜곡 문제와 삼상에서의 단상 부하의 부적절한 분배로 인한 전류 불평형이 심한 빌딩이 조사되었다. 본 연구 결과는 사무용 빌딩에서 합리적이고 경제적인 부하운용을 위해 사용될 수 있을 것이다.

Abstract

Nonlinear electronic loads used at office buildings distort the voltage and current waveform that cause the overheating of transformer losses, ELB(Electrical Leakage Breaker) tripping, and so on. This paper analyzed waveform distortion characteristics at several office buildings by comparing with magnitude of voltage and current harmonics, crest factor of voltage and current, phase voltage and current unbalance. As a consequence, severe current waveform distortion in phase and neutral line by harmonics and high current unbalance rates by unbalanced using of single loads among the three phases are investigated. The results of the study can be used in making decisions regarding reasonable and economical operating of loads at office buildings.

Key Words : Office building, Non-linear, Waveform distortion, Harmonics, Crest factor

1. 서 론

최근, 사무용 빌딩에서의 개인용 컴퓨터, 팩스, 대

형 통신 설비 및 시험설비 등과 같이 스위치 모드 전원공급장치(Switch-Mode Power Supply : SMPS)를 채택한 비선형 기기사용의 증가로 인해 전압 및 전류 파형의 왜곡이 심해지고 있다. SMPS를 채택한 전자 장비들은 60[Hz]의 교류를 직류로 변환하는 과정에서 전류파형을 왜곡시키고 고조파(Harmonics)를 발생시키게 되어 중성선 과열, 차단기 및 릴레이 오동작, 변압기 소음 및 손실, 전자장비의 오동작, 설

* 주저자 : 한국전기안전공사 전기안전연구원 진단연구팀장
Tel : 031-580-3160, Fax : 031-580-3111

E-mail : jgyoo@kesco.or.kr
접수일자 : 2004년 11월 11일
1차심사 : 2004년 11월 12일
심사완료 : 2004년 11월 19일

사무용 빌딩에서의 전압 및 전류파형 왜곡특성 분석

비사고 등을 유발하고 정전 등의 파급사고로 이어져 그 피해는 엄청날 수밖에 없다.

특히 대부분의 사무용 빌딩에서는 비선형 단상 부하로 구성되어 있어 3고조파 위주의 다량의 고조파가 발생하며 3상 4선식 계통에서 중성선의 과전류를 유발시키며 상간 부하 분배의 불균형으로 전압 및 전류 불평형을 초래하여 변압기 과열, 차단기류의 부적절한 동작, 전자장비의 오동작 등의 문제점이 발생하게 된다[1~2].

이와 같이 사무용 빌딩에서의 비선형 부하에 의한 고조파 발생과 전압 및 전류 파형 왜곡 문제에 대해 국내·외에서 컴퓨터 부하, 엘리베이터 및 전산센터의 고조파 및 전력품질(Power quality) 분석 등 다양한 연구가 이루어져 부하 모델별 전력품질에 대한 대책 수립에 많은 기여를 하였다[3~5].

하지만 아직까지 사무용 빌딩에서 전기설비에 공급되는 전원의 왜곡정도를 표현하거나 관련된 전력품질 문제의 해결을 위해 전압 및 전류파형 왜곡의 정도를 표시하는 지표인 고조파 특성, crest factor (과고율, 이하 crest factor 또는 CF)의 분석과 사무용 빌딩에서 단상부하의 사용으로 인한 전압 및 전류 불평형에 대한 전반적인 조사는 미비한 실정이다.

따라서 본 논문에서는 15개소의 사무용 빌딩에서 각각 평상시 부하 사용률 및 특성이 전력품질 측정 시점과 거의 비슷하고 부하의 대부분이 컴퓨터, 팩스, 전자식 안정기 및 각종 사무기기, 시험기기 등의 단상 부하로 이루어져 있는 3상 4선식 빌딩의 변압기 2차측에서 RPM(Reliable Power Meter)사의 1650 전력분석기를 이용하여 매 1초마다 샘플링 하여 1시간 동안 전력 품질을 측정하였다. 측정된 결과는 평균값을 산출하고 각 빌딩들마다 고조파, crest factor 특성, 전압 및 전류 불평형률을 비교함으로써 사무용 빌딩에서의 전압 및 전류 파형 왜곡 특성을 분석하였다.

2. 파형왜곡의 지표

푸리에(Fourier) 분석을 통해, 전압 및 전류 파형은 dc 성분과 다양한 크기와 위상을 갖는 사인파(sine wave)의 합으로 표현될 수 있다. 어떤 주기적

인 전압 파형 $V(t)$ 는 dc 성분 V_0 과 기본주파수 w 를 갖는 사인파의 형태로 식 (1)과 같이 표현할 수 있으며 전류 파형 $I(t)$ 에 대해서도 같은 식으로 적용할 수 있다.

$$V(t) = V_0 + \sum_{n=1}^{\infty} V_n \sin(nwt + \theta_n) \quad (1)$$

이러한 개별적 사인 파형은 기본주파수의 정수배가 되고 이를 고조파(Harmonics)이라 불리우며, 고조파 차수는 기본파의 정수배로 정의된다[6]. 각 차수별 고조파 성분의 RMS(Root-Mean Square) 값이 I_n 일때, 전류파형의 RMS 값 I_{RMS} 와 전압파형의 RMS 값 V_{RMS} 를 각각 식 (2)와 식 (3)과 같이 구할 수 있다.

$$I_{RMS} = \sqrt{\sum_{n=1}^{\infty} (I_n)^2} \quad (2)$$

$$V_{RMS} = \sqrt{\sum_{n=1}^{\infty} (V_n)^2} \quad (3)$$

계통의 전압 및 전류 파형의 왜곡을 표현할 수 있는 대표적인 지표는 식 (4)와 (5)로 표현할 수 있는 THD(Total Harmonic Distortion)이다. THD는 총 고조파율로서 기본파 성분과 그 외 파형간의 모양의 근접도를 나타내는 지표이며 이 둘 값들은 기본파 성분에 대한 퍼센트 비율로서 표현된다[6].

$$V_{THD} = \frac{1}{V_1} \left(\sum_{n=2}^{\infty} V_n^2 \right)^{1/2} \quad (4)$$

V_1 : 기본파 전압 V_n : n 차 고조파 전압

$$I_{THD} = \frac{1}{I_1} \left(\sum_{n=2}^{\infty} I_n^2 \right)^{1/2} \quad (5)$$

I_1 : 기본파 전류, I_n : n 차 고조파 전류

이러한 전압 및 전류 THD에 관해 미국, 일본 등 선진국 대부분의 국가에서 기준을 마련하여 규제하

고 있다[6~7]. 대표적으로 IEEE 519에 의하면 일반적으로 말단 수용가(End user) 설비에 공급되는 전압 THD의 기준은 5%이하로 규정되고 있으며 전류의 고조파 기준은 차수별 기준을 수립하거나 일본 경우는 계약용량에 따라 차수별 고조파 기준을 수립하여 고조파 발생을 억제하고 콘덴서 및 리액터 소손, 차단기 오동작 등의 문제점을 사전에 예방하려는 노력을 하고 있다.

전압 및 전류파형 왜곡을 표현할 수 있는 또 다른 요소 중 하나는 식 (6)과 같이 전류 파형의 피크 값과 RMS 값의 비로 나타내는 crest factor로써 이상적인 값은 1.414이다[8].

$$Crest\ factor = \frac{I_{Peak}}{I_{RMS}} \quad (6)$$

이러한 crest factor 값이 1.414보다 작을 경우는 전압 및 전류파형의 최대치가 함몰되는 플랫 탑핑(Flat-topping) 현상이 발생하고 1.414 이상이 되었을 경우는 파형의 최대치가 뾰족해지는 현상이 발생하게 되어 릴레이가 오동작 하거나 의료장비 및 정밀 실험장비의 경우 실험시마다 데이터가 틀려지는 문제점이 발생할 수 있다.

마지막으로 비록 수용가에 공급되는 전압 및 전류 파형의 왜곡을 표현하기 위해 사용되지 않지만, 사무용 빌딩에서 다량의 단상부하를 사용함에 따라 전압 불평형을 발생시키고 이는 차단기 오동작 및 변압기 과열, 전동기 효율 저하 등을 야기할 수 있다. 이러한 전압 불평형 정도를 나타내기 위해 미국의 NEMA(National Equipment Manufacturer's Association)에서는 식 (7)과 같이 대칭성분을 이용하여 정상분에 대한 역상분 전압의 비로써 전압 불평형을 (Voltage Unbalance Rate : VUR)을 정의하고 IEC에서는 2%로 기준으로 정하고 있다[9, 10].

$$VUR = \frac{\text{역상분 전압}}{\text{정상분 전압}} \quad (7)$$

하지만 대칭성분에 대한 정확한 계산이 어려울 경우가 많으므로 IEEE 112에서는 식 (8)과 같이 위상은 고려하지 않고 단순히 상 전압 크기를 이용하여

상 전압 불평형율(Phase Voltage Unbalance Rate : PVUR)을 계산하며 계통의 전력손실 등을 계산하기 위해 류 불평형율 전압과 같은 방식으로 계산하기도 한다[11-12].

$$PVUR = \frac{\text{평균 상전압에서 최대이탈전압}}{\text{평균 상전압}} \quad (8)$$

3. 고조파 특성

본 논문에서 측정 및 분석된 사무용 빌딩 15개소의 상별 전압 및 전류 THD를 그림 1~3에 나타내었다. 상 전압 THD는 최고 8.72[%], 최소 0.6[%]정도를 나타내었고 상 전류 THD는 최고 63[%], 최소 5.1[%]정도를 나타내었다.

또한 상 전압 THD가 5[%]이상을 나타내는 수용가는 3개소 정도로 IEEE 519의 수용가의 전압 THD 규정 5[%]를 만족시키지 못하는 것으로 나타났으며 상 전류 THD가 20[%]이상을 나타내는 수용가는 7개소로 조사되어 사무용 빌딩의 50[%]정도가 많은 양의 고조파 전류가 발생되고 있어 전류파형의 왜곡 정도가 높음을 알 수 있고 고조파 발생 및 피해를 줄이기 위한 대책이 필요한 것으로 조사되었다.

사무용 빌딩에서의 고조파 스펙트럼 범위는 3차부터 17차 고조파까지를 보였고 전류의 경우 9차 고조파 이상부터는 3, 5, 7차 고조파에 비해 아주 작은 양이 발생하였다. 전압의 경우는 7차 고조파 이하가 주로 발생하였고 9차 고조파 이상부터는 1[%] 이하를 나타내었다. 또한 대부분의 사무용 빌딩에서에서 컴퓨터, 전자식 안정기, 팩스, 대용량 전산설비 등의 단상 비선형 부하에 의한 3차 고조파가 가장 많은 비율을 차지하는 것으로 나타났다.

그림 4에서는 중성선 전류 고조파 분석 결과를 보여주고 있다. 15개소 사무용 빌딩의 중성선에서 대부분의 전류 THD가 100[%]이상을 나타내었고 평균 값은 368[%] 정도 되었으며 1000[%]이상을 보이는 곳도 2개 소로 조사되었다. 이러한 중성선 고조파 전류는 각 상의 영상분 고조파(3차, 6차, 9차 고조파)가 스칼라적 합이 되어 중성선에 흐르게 됨으로써 상 고조파 크기의 3배가 되기 때문이다.

사무용 빌딩에서의 전압 및 전류파형 왜곡특성 분석

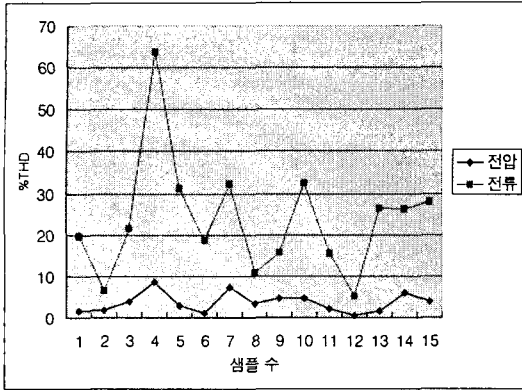


그림 1. 전압 및 전류 [%] THD(A상)
Fig. 1. Voltage and current percentage THD(Phase A)

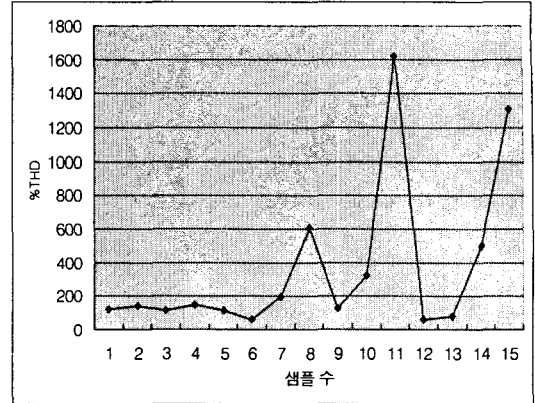


그림 4. 중성선 전류 [%] THD
Fig. 4. Neutral line current percentage THD

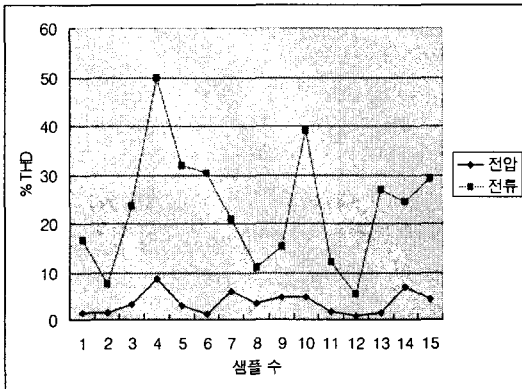


그림 2. 전압 및 전류 [%] THD(B상)
Fig. 2. Voltage and current percentage THD(Phase B)

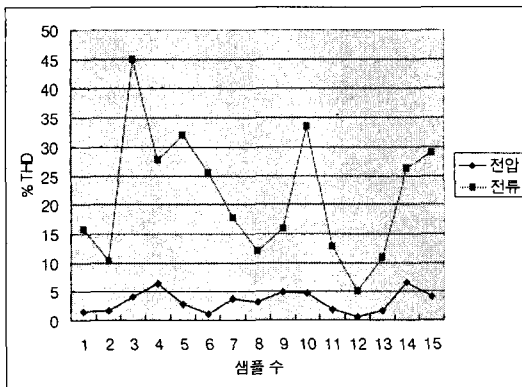


그림 3. 전압 및 전류 [%] THD(C상)
Fig. 3. Voltage and current percentage THD(Phase C)

표 1과 2에서는 본 논문에서 조사된 사무용 빌딩 중 대표적으로 병원, 학교, 은행, 일반 사무 빌딩에서의 각 상과 중성선의 차수별 전압 및 전류 고조파 및 THD 값을 보여주고 있다. 표 1과 2에서 알 수 있듯이 대부분의 상에서 전류 고조파는 3차 고조파를 위주로 5차, 7차, 9차 고조파 등이 발생하여 전류 THD가 20[%]이상 발생함을 알 수 있다. 또한 중성선에서는 측정 장소마다 3차 고조파가 가장 많은 비율을 차지하고 있고 중성선 전류 THD가 100[%]이상 됨을 알 수 있다.

표 1. 상의 전류 및 전압 고조파 THD
Table 1. Current and voltage harmonics THD of Phase

단위 : [%]

고조파	○○병원			○○빌딩			○○은행			○○학교		
	A	B	C	A	B	C	A	B	C	A	B	C
전류 THD	20	17	16	64	50	28	21	24	45	31	32	32
3차	7.9	5.6	1.6	52	41	22	14	13	35	24	25	25
5차	15	15	13	32	24	14	13	17	24	16	15	15
7차	9.4	5.2	7.8	13	9.7	8	5.8	9	12	9.4	9.9	9.9
9차	2.0	1.5	0.9	7	7.9	3.7	1.7	2.9	4.0	2.6	4.2	4.2
11차	0.6	0.2	0.7	8	4.7	2.2	4.1	1.3	5.0	4.6	6.3	6.2
13차	1.1	0.2	1.0	8	4.7	1.5	4.7	1.9	4.7	3.0	5.2	5.2
전압 THD	1.5	1.4	1.5	8.7	8.7	6.4	3.9	3.1	4.1	2.8	2.8	2.8
3차	0.5	0.9	0.8	7.1	7.7	5.6	1.6	1.2	1.6	1.1	1.0	1.0
5차	1.0	0.6	0.6	3.6	2.6	2.1	1.9	1.5	2.0	2.2	2.0	1.9
7차	0.4	0.4	0.9	1.4	1.7	1.4	2.0	1.8	2.0	0.7	0.9	0.9
9차	0.2	0.2	0.1	1.9	2.1	1.3	0.5	0.5	0.6	0.3	0.6	0.6
11차	0.2	0.2	0.2	1.5	0.9	0.7	0.5	0.4	0.7	0.7	0.9	0.9

표 2. 중성선의 전류 고조파 THD
Table 2. Current harmonics THD of neutral line
단위 : [%]

고조파	○○병원	○○빌딩	○○은행	○○학교
전류 THD	138.5	150.1	112.4	675.9
3차	129	143	107.8	669.6
5차	15	35.4	17.0	31.9
7차	22.9	12.7	13.5	20.0
9차	36.6	20.2	12.9	69.2
11차	6.2	9.3	6.2	30.4
13차	4.0	9.1	6.2	10.5

4. Crest factor 특성

15개소의 사무용 빌딩에서 측정된 결과로부터 분석된 각 상 전압 및 전류 crest factor는 그림 5~7에 나타내었다. 그림에서 알 수 있듯이 2개 이상의 수용가의 전류 crest factor가 2 이상을 나타냈고 평균적으로 1.8 이상으로 분석되었으며 최소값과 최대값은 각각 1.44와 2.19로 나타났다.

전압 crest factor는 대부분 1.3~1.47사이로 조사되었으며 최소값과 최대값은 각각 1.28과 1.47로 분석되어 이상적인 값 1.414에 근사한 값을 보여주었지만 crest factor가 낮은 사무용 빌딩들에서는 그림 7에서 같이 전압 파형의 끝이 납작해지는 플랫폼 탑핑(Flat-topping) 현상이 발견되었다.

이러한 crest factor 값들에 의한 전압 및 전류 파형의 분석을 통해 사무용 빌딩에서는 전압파형의 왜곡보다 전류파형의 왜곡현상이 심한 것을 알 수 있다.

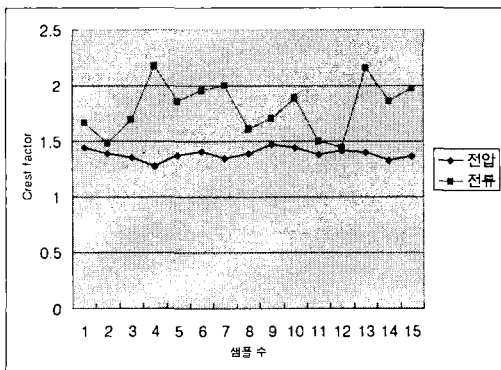


그림 5. 전압 및 전류 crest factor(A상)
Fig. 5. Voltage and current crest factor(Phase A)

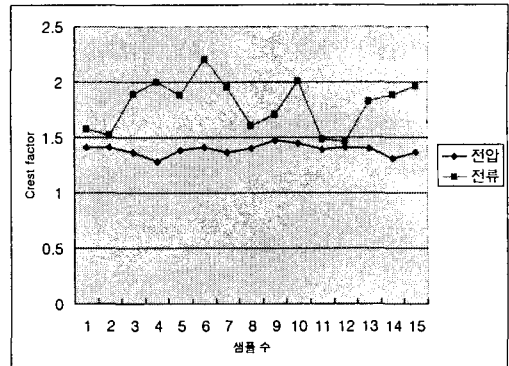


그림 6. 전압 및 전류 crest factor(B상)
Fig. 6. Voltage and current crest factor(Phase B)

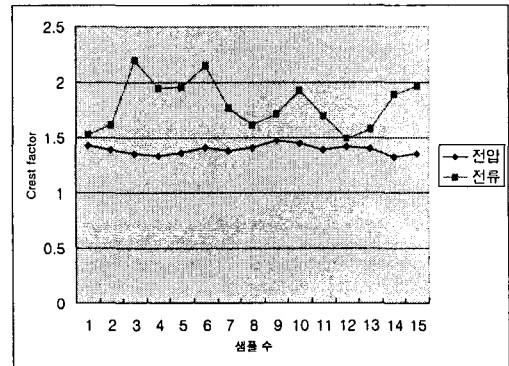


그림 7. 전압 및 전류 crest factor(C상)
Fig. 7. Voltage and current crest factor(Phase C)

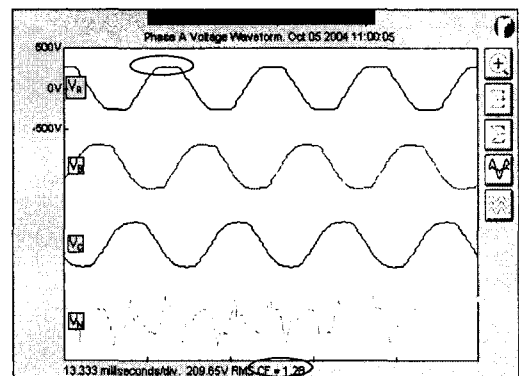


그림 8. 플랫폼 탑핑 전압파형
Fig. 8. Flat-topping voltage waveform

5. 상 전압 및 전류 불평형 특성

사무용 빌딩에서의 전압 및 전류 불평형 요인은 대부분 단상부하 사용에 기인한다. 본 연구에서 조

사무용 빌딩에서의 전압 및 전류파형 왜곡특성 분석

사된 전압 및 전류 불평형은 그림 9와 10에 나타내었다. 전압 불평형의 경우 대부분 2[%]이하로 안정되게 나타났으며 전류 불평형의 경우 대부분의 경우 20[%]이하로 조사되었지만 3개소에서는 전압 불평형이 낮음에도 불구하고 전류 불평형이 30[%]이상으로 조사되었다.

최근 대부분의 사무용 빌딩에서 전압 및 전류 불평형을 줄이기 위해 많은 노력을 기울이고 있지만 완전한 해결은 쉽지 않을 것이다. 하지만 단상 부하의 적절한 분배, 전압 불평형에 민간함 전자장비 사용을 피하는 방법 등을 통해 전압 불평형 및 피해를 최대한으로 줄일 필요가 있다. 또한 전압 불평형이 낮을 지라도 전류 불평형이 심할 경우 차단기 오동작 및 변압기 과열의 원인이 될 수 있게 되므로 전류 불평형을 줄이기 위한 노력도 필요할 것이다.

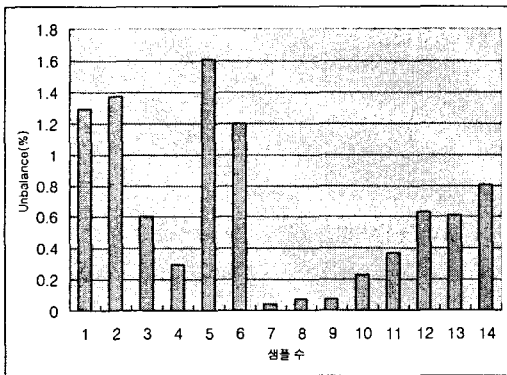


그림 9. 전압 불평형
Fig. 9. Voltage unbalance

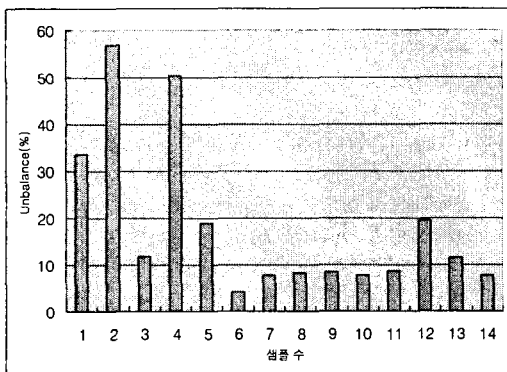


그림 10. 전류 불평형
Fig. 10. Current unbalance

6. 결 론

본 연구에서는 사무용 빌딩들에서의 측정된 전압 및 전류 고조파, crest factor, 전압 및 전류 불평형 등의 전압 및 전류파형 왜곡의 특성을 보여 주었다.

사무용 빌딩에서의 상 전류 THD는 평균 20[%] 이상이었고 증성선 전류 THD는 평균 300[%]이상으로 조사되었다. 또한 전압 crest factor는 1.3~1.47 정도로 조사되어 이상적인 값에 가까웠지만 전류의 경우는 평균 1.8이상으로 나타나 많은 비선형 단상 부하를 사용함에 따라 기준치 이상의 고조파가 발생하여 전류 파형의 왜곡이 심하게 나타남을 알 수 있었다. 전압 불평형은 대부분 2[%] 이하로 나타나 안정적이었지만 전류 불평형은 30[%] 이상인 곳이 3개소로 조사되어 비록 전압 불평형은 안정적일지라도 전류 불평형이 심한 것을 알 수 있었다.

따라서 사무용 빌딩에서의 전압 및 전류 파형 왜곡에 대해 지속적인 관찰 및 분석 노력을 기울이고 단상 부하의 적절한 분배를 통 전압 및 전류 불평형을 해소해야 된다. 또한 스위치 모드 전원공급 장치 자체의 고조파 발생 감소를 통해 파형왜곡의 감소, 전기설비의 고조파 내성 및 신뢰성 향상과 같은 다각적인 검토가 필요한 것으로 사료된다.

본 연구는 전력산업기반기금 전력산업연구개발사업의 연구비 지원으로 수행되었습니다.

References

- (1) IEEE Task Force, "Effects of harmonics on equipment", IEEE Trans. Power Delivery, Vol. 8, Apr. 1993, pp. 672-680.
- (2) IEEE Task Force, "The effects of harmonics on power systems equipment and loads", IEEE Trans. Power Delivery, Vol. PAS-104, Sept. 1985, pp. 2555-2563.
- (3) 이상중 외 3명, "집적정보통신시설 고조파 분석 및 다상 효과 관찰", 한국조명·전기설비학회 학술대회지, 2002, pp. 133-138.
- (4) Don O. Koval, Fellow, IEEE and Clive Center, "Power Quality Characteristics of Computer Loads", IEEE Trans. Industry Application, Vol. 33, No. 3, May/June 1997.
- (5) 한국전기안전공사, "전기사용장소의 고조파 장애분석 연구", 1996.

[6] IEEE Standard 519-1992, "IEEE Recommended Practices and Requirements for Harmonic Control in Electrical Power systems".

[7] 관동전기보안협회, "고압 자가용 수송가의 고조파 장해 · 억제대책 사례 Q&A", 성안당, 2000.

[8] J. Arrillaga, N. R. Watson and S. Chen, "Power System Quality Assessment, WILEY", 2001.

[9] Motors and Generators, ANSI/NEMA Standard MG1-1993.

[10] EPRC Power Electronics Applications Center, "Input performance of ASDs during supply voltage unbalance", Power quality testing network PQTN Brif No. 28, 1996.

[11] IEEE Standard Test Procedure for Polyphase Induction Motors and Generators, IEEE Standrd 112, 1991.

[12] T. H. Chen, "Evaluation of line loss under load unbalance using the complex unbalance factor", IEEE Proc.-Gener. Transm. Distrib., Vol. 142, No. 2, March 1995, pp. 173-178.

◇ 저자소개 ◇

유재근 (俞在根)

1965년 12월 5일생. 1990년 건국대학교 전기공학과 졸업. 1992년 건국대학교 대학원 전기공학과(석사)졸업. 1992~1996년 대우전자 연구소 근무. 현재 건국대학교 대학원 박사과정 수료. 현재 한국전기안전공사 전기안전연구원 진단연구1팀 팀장.

이상익 (李尙益)

1968년 12월 9일생. 1994년 호서대학교 전기공학과 졸업. 1996년 호서대학교 대학원 전기공학과(석사) 졸업. 현재 건국대학교 대학원 박사과정 수료. 현재 한국전기안전공사 전기안전연구원 진단연구1팀 연구과장.

전정채 (全正采)

1971년 6월 8일생. 1997년 원광대학교 전기공학과 졸업. 1999년 원광대학교 대학원 전기공학과(석사) 졸업. 현재 한국전기안전공사 전기안전연구원 진단연구1팀 연구원.

정종욱 (鄭鍾旭)

1969년 2월 17일생. 1992년 숭실대학교 전기공학과 졸업. 1997년 숭실대학교 대학원 전기공학과(석사) 졸업. 2003년 숭실대학교 대학원 전기공학과(박사)졸업. 현재 한국전기안전공사 전기안전연구원 진단연구2팀 연구과장.

임용배 (林庸培)

1967년 6월 8일생. 1994년 원광대학교 전기공학과 졸업. 1998년 홍익대학교 테크노경영 대학원 전기제어공학과(석사) 졸업. 현재 홍익대학교 대학원 박사과정 수료. 현재 한국전기안전공사 전기안전연구원 진단연구2팀 연구원.