

빌딩전기설비의 고조파 분석 연구

이상익, 전정채, 유재근, 김동욱, 이기연, 최충석, 최규하*
한국전기안전공사 전기안전연구원, 건국대학교*

Analysis of Harmonic Characteristics at Buildings Electrical Installation

Sang-Ick Lee, Jeong-Chay Jeon, Jae-Geun Yoo, Dong-Ug Kim, Ki-Yeon Lee, Chung-Sug Choi, Gyu-Ha Choe*
Korea Electrical Safety Corporation Electrical Safety Research Institute, Konkuk University

Abstract - 3상 4선식의 빌딩전기설비에서 개인용 컴퓨터, 프린터, 팩스 및 각종 시험설비 등의 비선형 전자부하로 인해 전압 및 전류파형을 왜곡시킨다. 이러한 파형 왜곡은 고조파로 불리고, 중성선 과열 및 변압기 손실을 유발시킨다. 본 논문에서는 대형 빌딩전기설비의 전압 및 전류 고조파 크기, 전압 및 전류 불평형 등의 고조파 특성을 비교 분석하였다. 분석 결과 고조파에 의한 상 및 중성선에서의 심각한 파형 왜곡 문제와 상상에서의 단상부하의 부적절한 분배로 인한 전류불평형이 심한 빌딩이 조사되었다. 따라서 빌딩전기설비에서 고조파로 인한 피해를 줄이기 위해 우선적으로 단상부하의 적절한 분배가 필요할 것이다.

특성을 분석하였다.

2. 본 론

2.1 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 주기적인 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.

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

개별적 사인 파형은 기본주파수의 정수배가 되고 이를 고조파라 불리우며, 고조파 차수는 기본파의 정수배로 정의된다[4]. 각 차수별 고조파 성분의 RMS값이 I_n 일때, 전류파형의 RMS값 I_{RMS} 와 전압파형의 RMS값 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 있는THD이다. THD는 총 고조파율로서 기본파 성분과 그 외 파형간의 모양의 근접도를 나타내는 지표이며 이 둘 값들은 기본파 성분에 대한 퍼센트 비율로써 표현된다[4].

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

V_1 : 기본파 전압 V_n : n차 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 : n차 고조파 전류

이러한 전압 및 전류 THD에 관해 미국, 일본 등 선진국 대부분의 국가에서 기준을 마련하여 규제하고 있다 [4]. 대표적으로 IEEE 519에 의하면 일반적으로 말단 사용자(End user) 설비에 공급되는 전압 THD의 기준은 5%이하로 규정되고 있으며 전류의 고조파 기준은 차수별 기준을 수립하거나 일본의 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[5].

1. 서 론

최근, 빌딩과 같은 건물에서 개인용 컴퓨터, 팩스, 대형 통신 설비 및 시험설비 등과 같이 스위치모드 전원공급장치(SMPS)를 채택한 비선형 기기사용의 증가로 인해 전압 및 전류 파형의 왜곡이 심해지고 있다. SMPS를 채택한 전자 장비들은 60Hz의 교류를 직류로 변환하는 과정에서 전류파형을 왜곡시키고 고조파를 발생시키게 되어 중성선 과열, 차단기 및 릴레이 오동작, 변압기 소음 및 손실, 전자장비의 오동작, 설비사고 등을 유발하고 정전 등의 파급사고로 이어져 그 피해는 엄청날 수밖에 없다.

특히, 대부분의 빌딩전기설비에서는 비선형 단상 부하로 구성되어 있어 3고조파 위주의 고조파가 다량 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 빌딩전기설비에서 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].

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

따라서, 본 논문에서는 차단기 및 릴레이 오동작, 변압기 과열, 콘덴서 소손 등의 문제점이 발생하여 전력품질 분석을 요구한 병원, 학교, 오피스 빌딩 등 15개소의 변압기 2차측에서 RPM(Reliable Power Meter)사의 658장비를 이용하여 전력품질 측정하였고 전압 및 전류 고조파, crest factor 특성, 전압 및 전류 불평형 특성을 비교함으로써 빌딩전기설비에서의 전압 및 전류 파형 왜곡

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

이러한 crest factor 값이 1.414보다 작을 경우는 전압 및 전류파형의 최대치가 합몰되는 플랫폼 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 틀러지는 문제점이 발생할 수 있다.

빌딩과 같은 건물에서 다량의 단상부하를 사용함에 따라 전압 불평형을 발생시키고 이는 차단기 오동작 및 변압기 과열, 전동기 효율 저하 등을 발생시킬 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[6, 7].

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

하지만 대칭성분에 대한 정확한 계산이 어려울 경우 많으므로 IEEE 112에서는 식 (8)과 같이 위상은 고려하지 않고 단순히 상 전압 크기를 이용하여 상 전압 불평형을(Phase Voltage Unbalance Rate : PVUR)을 계산하며 계통의 전력손실 등을 계산하기 위해 불평형을 전압과 같은 방식으로 계산하기도 한다.

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

2.2 고조파 특성

본 논문에서 측정 및 분석된 빌딩전기설비 15개소의 상전압 및 상전류 THD를 그림 1에 나타내었다. 상 전압 THD는 최고 8.72%, 최소 0.6%정도를 나타내었고 상 전류 THD는 최고 63%, 최소 5.1%정도를 나타내었다.

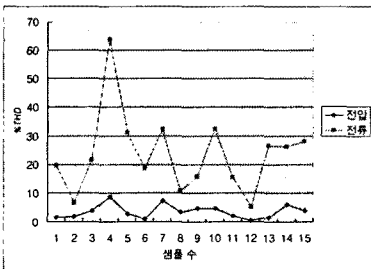


그림 1. 상전압 및 상전류 % THD

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 빌딩전기설비의 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.

빌딩전기설비에서의 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 건물에서 컴퓨터, 전자식 안정기, 팩스, 대용량 전산설비 등의 단상 비선형 부하에 의한 3차 고조파가 가장 많은 비율을 차지하는 것으로 나타났다.

그림 2에서는 중성선 전류 고조파 분석 결과를 보여주고 있다. 15개소 사무용 빌딩의 중성선에서 대부분의 전

류 THD가 100%이상을 나타내었고 평균값은 368% 정도 되었으며 1000%이상을 보이는 곳도 2개소로 조사되었다. 이러한 중성선 고조파 전류는 각 상의 역상분 고조파(3차, 6차, 9차 고조파)가 스칼라적 합이 되어 중성선에 흐르게 됨으로써 상 고조파 크기의 3배가 되기 때문이다.

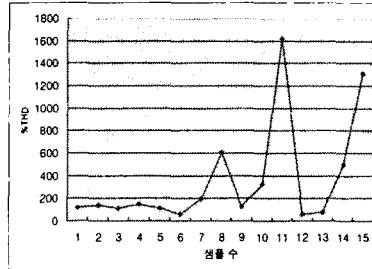


그림 2. 중성선 전류 % THD

표 1. 상의 전류 및 전압 고조파 THD

단위 : %

고조파	○○병원			○○빌딩			○○은행			○○학교		
	A	B	C	A	B	C	A	B	C	A	B	C
상 전류THD	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
전압THD	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

표 2. 중성선의 전류 고조파 THD

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

표 1과 2에서는 본 논문에서 조사된 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.

2.3 Crest Factor 특성

15개소의 빌딩전기설비에서 측정된 결과로부터 분석된 각 상 전압 및 전류, crest factor는 그림 3에 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 빌딩들에서는 그림 4와 같이 전압 파형의

끝이 납작해지는 플랫 탑핑(Flat-topping) 현상이 발견되었다.

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

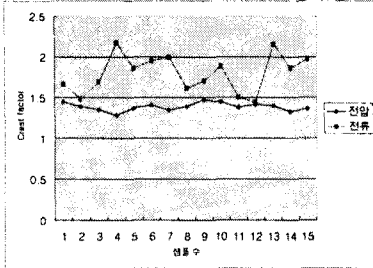


그림 3. 상전압 및 전류 Crest factor

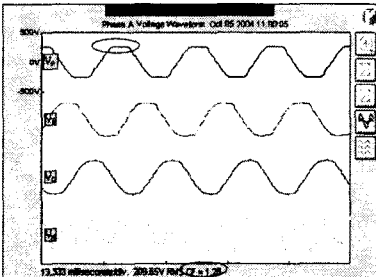


그림 4. 플랫 탑핑 전압파형

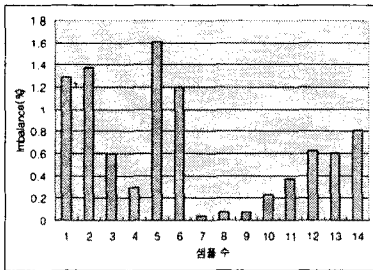


그림 5. 전압 불평형

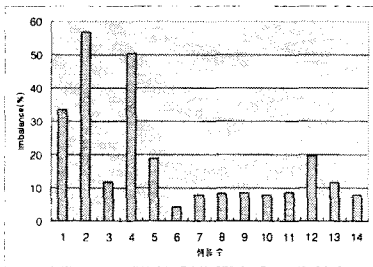


그림 6. 전류 불평형

2.3 상전압 및 전류불평형 특성

빌딩전기설비에서의 전압 및 전류 불평형 요인은 대부분 단상부하 사용에 기인한다. 본 연구에서 조사된 전압 및 전류 불평형은 그림 5와 6에 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 빌딩에서 전압 및 전류 불평형을 줄이기 위해 많은 노력을 기울이고 있지만 완전한 해결은 쉽지 않을 것이다. 하지만 단상 부하의 적절한 분배, 전압 불평형에 민감한 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.

3. 결 론

본 연구에서는 빌딩전기설비에서 측정된 전압 및 전류 고조파, crest factor, 전압 및 전류 불평형 등 전압 및 전류파형 왜곡의 특성을 보여 주었다.

빌딩전기설비에서 상 전류 THD는 평균 20% 이상이었고 중성선 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 단상부하를 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 안정적일 지라도 전류 불평형이 심한 것을 알 수 있었다. 따라서 빌딩전기설비에서의 전압 및 전류 파형 왜곡에 대해 지속적인 관찰 및 분석에 대한 노력을 기울이고 단상 부하의 적절한 분배를 통한 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.

[참 고 문 헌]

- [1] IEEE Task Force, "Effects of harmonics on equipment", IEEE Trans. Power Delivery, Vol. 8, pp. 672-680, Apr. 1993
- [2] IEEE Task Force, "The effects of harmonics on power systems equipment and loads", IEEE Trans. Power Delivery, Vol. PAS-104, pp. 2555-2563, Sept. 1985
- [3] 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
- [4] IEEE Standard 519-1992, "IEEE Recommended Practices and Requirements for Harmonic Control in Electrical Power systems"
- [5] J. Arrillaga, N. R. Watson and S. Chen, "Power System Quality Assessment, WILEY", 2001
- [6] Motors and Generators, ANSI/NEMA Standard MG1-1993
- [7] EPRC Power Electronics Applications Center, "Input performance of ASDs during supply voltage unbalance", Power quality testing network PQTN Brif No. 28, 1996