

현장 측정에 의한 일반 가정집 부하의 고조파 수준 조사

(A Survey of the Harmonics Level on a Typical Household Loads
by Field Measurements)

김경철* · 오경훈 · 최형범 · 홍사근

(Kyung-Chul Kim · Kyung-Hoon Oh · Hyoung-Bumb Choi · Sa-Guen Hong)

요 약

일반 가정집 부하는 컴퓨터, 비디오, 냉장고, 마이크로웨이브 오븐, TV, 오디오 등의 많은 비선형 부하를 가지고 있다. 이들 비선형 부하는 고조파 전류를 발생시키고, 전력계통의 정현파 전압을 왜곡시킨다. 고조파 측정 결과로 고조파는 시간에 따라 변하는 특성이 관측되었다. 시간에 따라 변하는 고조파를 해결하기 위해서 쓰이는 가장 보편적인 방법은 누적확률을 사용하는 것이다. 본 논문에서는 일년동안 일반 가정집 부하의 고조파 측정을 하고, 현존하는 가정집 부하의 고조파 수준과 미래의 고조파 영향을 예측하기 위한 목적의 조사를 심도있게 다루고자 하였다.

Abstract

Typical household loads have nonlinear loads including a personal computer, video, refrigerator, microwave oven, TV, and audio set. These nonlinear loads generate harmonic currents and create distortions on the sinusoidal voltage of the power system. Harmonic field measurements have shown that the harmonic contents of a waveform varies with time. A cumulative probabilistic approach is the most commonly used method to solve time varying harmonics. This paper provides in depth analysis on harmonics field measurement of the typical household loads for one year period and the survey is conducted with the objectives to identify the trends of harmonic distortion level present and indentify the future trends of metering in the presence of nonsinusoidal current and voltage waveforms in the system.

Key Words : Household loads, Harmonics measurement, Harmonics assessment, Harmonics level

1. 서 론

일반 가정집에는 컴퓨터, 비디오, 냉장고, 마이크로 오븐, TV, 오디오, 세탁기 등 비선형 부하가 많기 때문에 근본적으로 고조파 발생원이라 할 수 있다.

고조파 발생원에 대한 정확하고 신뢰성 있는 측정과 평가는 전력 시스템의 오동작과 고장 등을 예방

* 주저자 : 홍익대학교 전기공학과 교수
Tel : 041-860-2568, Fax : 041-863-7605
E-mail : yangjier@hongik.ac.kr
접수일자 : 2008년 2월 19일
1차심사 : 2008년 2월 21일
심사완료 : 2008년 3월 7일

연장 측정에 의한 일반 가정집 부하의 고조파 수준 조사

할 수 있게 할 뿐만 아니라, 수용가와 전력회사의 역할과 책임을 분담하게 한다. 수용가는 할당된 범위 내에서 고조파 전류를 방출하여 전력 시스템의 전력 품질이 일정 수준 이상 유지하여야 하고, 전력회사는 고조파 전압이 일정 수준 이하가 되도록 유지시켜야 한다.

일반 수용가의 전기품질 문제는 수용가 자신에 의해서 발생된 것뿐만 아니라 전력계통에서 발생한 외란에 의해 발생한다. 가정집은 수용가의 전선 설계와 사용하는 전기설비 또는 부하 형태에 따라서 전기 품질에 영향을 받는다[1-2].

저압계통은 주상변압기 2차측으로부터 정의된다. 주상변압기 2차측의 여러 지점 중 사례연구에서는 수용가의 인입구에 설치된 전력량계 2차측을 선택하여 측정 장비를 설치하였다.

본 논문에서는 일반 가정집 부하의 고조파 수준을 파악하기 위해서 국제기준에 의거한 고조파 측정을 일 년에 걸쳐 하였다. 또한 가정집 부하에 주로 쓰이는 가전제품의 고조파 발생 정도를 측정하고자 하였다. 측정된 고조파는 국제기준에 의해 평가 및 분석하고자 한다.

2. 고조파 측정 및 분석

2.1 사례연구 시스템

그림 1은 사례연구 수용가의 단선도이다. 배전 변전소는 공급전압이 22.9[kV], 단락용량이 281[MVA], 단락 임피던스는 100[MVA] 기준으로 $0.18+j33.49$ [%]이다. 이 단선도는 고조파 시뮬레이션에 유용하게 쓰인다.

배전선로의 임피던스는 전력 케이블 특성과 수용가까지의 선로 구성 등 여러 가지 요인으로 구하기가 어렵다. 동일 조건의 고조파 시험을 하기 위한 기준 임피던스(Reference impedance)를 각 국가마다 정하여 사용하고 있다. 우리나라에서 제시한 임피던스는 $0.67+j0.37$ [%]이다[3].

주상변압기는 단상 13.2[kV]/220[V], 10[kVA]이고, 임피던스는 6[%], X/R=12로 간주한다. 그림 1에서 3상으로 고조파 시뮬레이션할 경우에는

22.9 [kV]/ 380 [V], 30 [kVA], $Z_t=6$ [%], X/R=12으로 하면 된다.

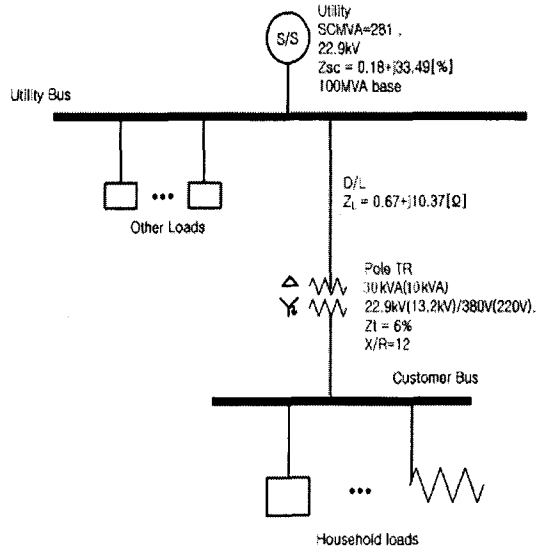


그림 1. 사례 연구 시스템의 단선도
Fig. 1. One-line diagram of the case study system

2.2 고조파 측정 장비

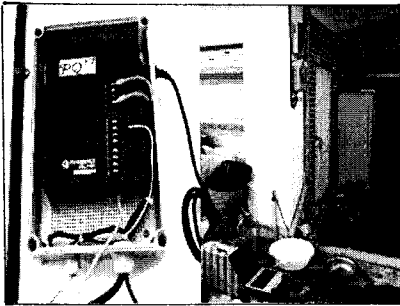
고조파 측정은 사례연구 수용가의 인입구에서 이루어졌다.

고조파는 시간에 따라 변하므로 IEC 61000-4-7[4]에 따라 측정시간을 순시치(Snapshot)와 10분(Short time)으로 한다.

고조파 측정장비는 순시치 측정용으로 BMI-PX5 [50], 10분 측정용으로 PQM 장비[6]가 사용되었다. BMI-PX5는 윈도우 크기가 12사이클로 측정하고, PQM 장비는 매 6초마다 6사이클 측정하여 10분에 100개의 데이터 중에서 최소, 평균, 최대 등 대표값을 저장한다.



(a) BMI-PX5



(b) PQM

그림 2. 측정 장비
Fig. 2. Measuring equipment

2.3 순시치 측정

BMI-PX5 장비로 측정한 전압과 전류의 파형과 크기는 그림 3과 표 1과 같다. 표 1은 고조파 전압과 전류를 차수별 고조파 왜형률(THD, Total Harmonic Distortion)과 위상각을 간추려 놓은 것이다.

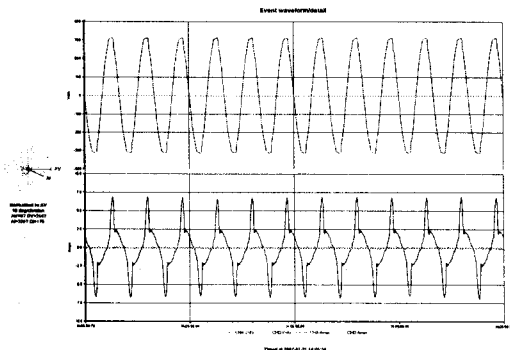


그림 3. 측정된 전압 및 전류 파형
Fig. 3. Measured voltage and current waveforms

고조파 시뮬레이션은 고조파 문제를 파악하고 분석하는데 중요한 역할을 한다. 고조파 시뮬레이션을 하기 위한 필요한 데이터는 고조파 발생원이 요구되는데, 주로 전류원을 고조파 발생원으로 하고 있다. 입력 데이터에 고조파 전류왜형률의 크기와 위상 차수별로 필요로 한다. 10분 측정에서는 누적확률로 대표값을 구하므로 크기만 알고 위상각은 알 수가 없다.

따라서 순시치 측정시 얻은 위상각을 사용하여 장기간의 고조파 시뮬레이션을 해야 한다.

표 1. 고조파 전압 및 전류
Table 1. Harmonic voltage and current

Order	Voltage		Current	
	THD[%]	Phase[°]	THD[%]	Phase[°]
1	100.0	270.0	100.0	294.55
2	0.0	335.23	1.341	246.2
3	2.619	205.99	37.372	113.93
4	0.016	97.56	0.9	28.41
5	0.813	46.45	26.428	309.16
6	0.006	31.04	0.847	206.78
7	0.506	260.88	13.956	160.61
8	0.025	84.78	0.463	11.1
9	1.841	109.74	7.538	17.64
10	0.006	114.18	0.284	134.84
11	0.653	9.93	3.191	293.65
12	0.006	9.61	0.322	308.88
13	0.325	236.08	4.766	169.45
14	0.003	141.6	0.256	115.43
15	0.650	141.41	4.175	26.16
16	0.0	299.94	0.15	255.91
17	0.425	352.51	2.091	47.44
18	0.006	18.64	0.069	149.4
19	0.334	212.54	2.163	222.95
20	0.006	129.84	0.097	34.29
21	0.519	130.85	2.681	30.25
~				
45	0.028	180.96	0.438	6.29
THD[%]	3.638		49.31	

주) $V_{rms}=226.18[V]$, $V_1=226.03[V]$, $I_{rms}=3.03[A]$,
 $I_1=2.71[A]$

2.4 10분 측정

고조파는 시간에 따라 변하므로 국제기준에서는 고조파 측정을 최소 일주일을 권장하고 있다. 고조파가 시간에 따라 매우 빠르게 변하는 경우의 측정은 전기 설비의 순간영향이나 오동작을 일으키는 원인을 파악하는데 유용하게 쓰이고, 고조파가 시간에 따라 다소 느리게 변하는 경우의 측정은 전기설비의 장기간 영향이나 소손 및 수명 감소의 원인을 추정하는데 쓰일 수 있다[7].

고조파 수준을 파악하기 위하여 PQM 장비를 설치하여 일 년간 측정된 데이터를 월 단위로 누적하여 정리하였다. 편의상 3월 데이터만 그래프로 나타내고, 표에는 일 년치를 간추려 놓았다. 그림 4~7은 3월의 전압, 전류, 역률, 피상전력의 시간 경향을 간추린 것이다.

그림 4에서 실효치 전압은 225~227[V] 사이로 일정 수준을 유지하고 있다. 참고로 한전의 전기 공급 약관에서는 220[V]±13[V] 이내로 전압을 공급하도록 되어 있다.

그림 5에서 실효치 전류는 1~3[A] 사이로 기본 부하로 추정되는 1[A]와 아침부터 저녁까지 부하 변동이 있고 3[A]까지 올라간다. 역률의 변화는 80~100[%]로 거의 변화가 없으며, 피상전력도 250~700[VA]으로 변화하지만 부하 변동이 거의 일정하게 있으며 부하량이 작은 가정이라 할 수 있다.

그림 8과 9는 PQM 장비로 3월 한 달 동안 전압과 전류 왜형률의 시간 경향을 보여주고 있다.

그림 8과 9에서 알 수 있듯이, 전압 왜형률과 전류 왜형률은 시간에 따라 변하는 특성을 가지고 있다. 이와 같이 시간에 따라 변하는 고조파를 평가하기 위해서는 누적확률(CP, Cumulative Probability)을

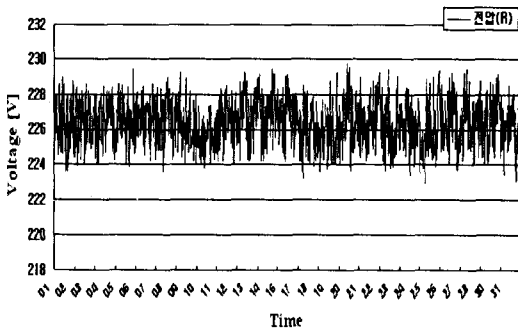


그림 4. 측정된 전압의 시간 경향
Fig. 4. Measured voltage time trends

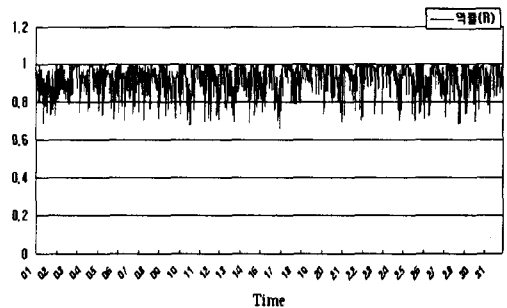


그림 6. 측정된 역률의 시간 경향
Fig. 6. Measured power factor time trends

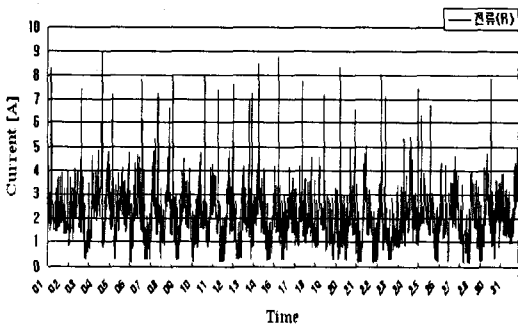


그림 5. 측정된 전류의 시간 경향
Fig. 5. Measured current time trends

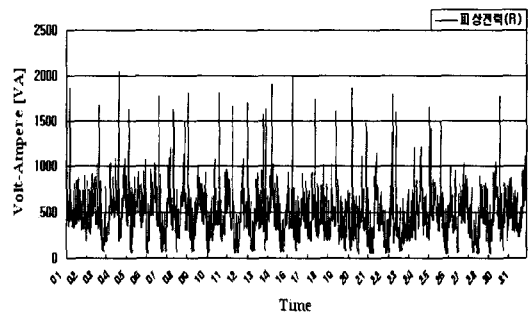


그림 7. 측정된 피상전력의 시간 경향
Fig. 7. Measured apparent power time trends

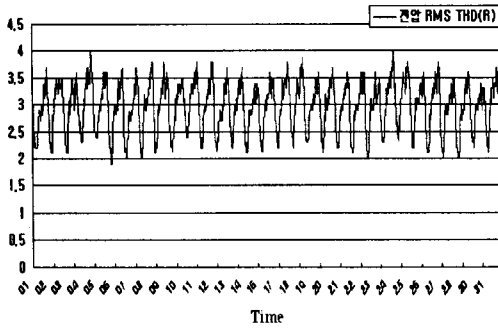


그림 8. 측정된 전압 왜형률의 시간 경향
Fig. 8. Measured voltage THD time trends

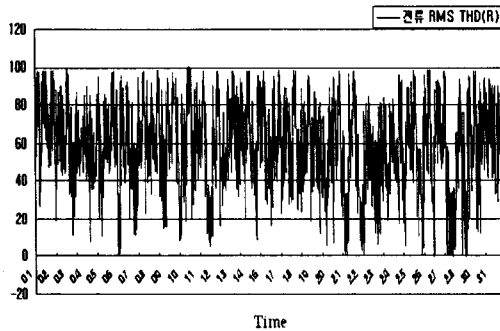


그림 9. 측정된 전류 왜형률의 시간 경향
Fig. 9. Measured current THD time trends

사용한다. 95[%]는 누적확률 값이 측정 기간 동안의 대표값으로 간주되고, 99[%]는 최대값으로 쓰이고 있다[8].

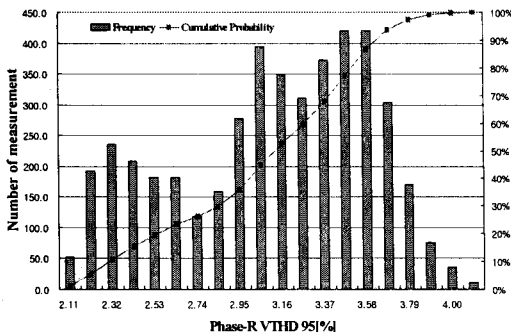


그림 10. 측정된 전압 왜형률의 누적 분포도
Fig. 10. Measured voltage THD cumulative probability distribution

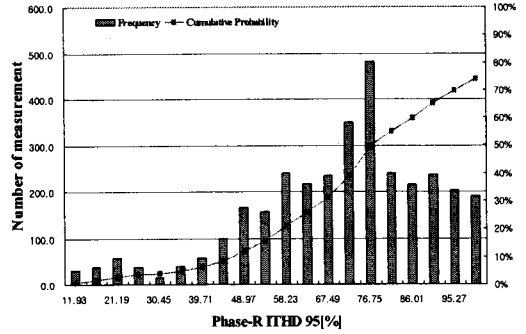


그림 11. 측정된 전류 왜형률의 누적 분포도
Fig. 11. Measured current THD cumulative probability distribution

그림 10은 PQM 장비로 3월 한 달 동안 측정한 전압 왜형률의 누적확률 분포도이고, 그림 11은 전류 왜형률의 누적확률 분포도이다.

표 2는 PQM 장비로 일년 동안 측정한 전압 왜형률의 누적확률 값을 간추려 놓은 것이고, 표 3은 전류 왜형률의 누적확률 값이다. PQM 장비는 고조파를 50차 까지 측정하고 있으나, 여기서는 편의상 17차까지만 나타내었다.

표 2. 전압 왜형률의 누적확률 값
Table 2. Cumulative probability values for voltage THD

order month	THD 95[%]	3차	5차	7차	9차	11차	13차	15차	17차
1월	3.52	2.46	1.028	0.752	2.025	0.527	0.247	0.405	0.368
2월	3.40	2.483	0.743	0.773	1.892	0.537	0.263	0.425	0.395
3월	3.41	2.426	0.698	0.784	1.974	0.571	0.256	0.455	0.34
4월	3.38	2.446	0.575	0.779	1.972	0.526	0.246	0.414	0.369
5월	3.50	2.509	0.648	0.749	2.039	0.547	0.294	0.526	0.383
6월	3.52	2.562	0.785	0.699	2.016	0.513	0.273	0.506	0.297
7월	3.67	2.694	0.782	0.649	2.066	0.547	0.326	0.564	0.39
8월	3.55	2.621	0.868	0.626	1.923	0.54	0.347	0.569	0.382
9월	3.49	2.562	0.73	0.648	1.933	0.554	0.341	0.535	0.39
10월	3.24	2.292	0.617	0.678	1.873	0.567	0.298	0.52	0.458
11월	3.25	2.275	0.838	0.57	1.961	0.47	0.231	0.389	0.336
12월	3.41	2.581	0.773	0.854	1.806	0.433	0.173	0.243	0.361

연장 측정에 의한 일반 가정집 부하의 고조파 수준 조사

표 3. 전류 왜형률의 누적확률 값

Table 3. Cumulative probability values for current THD

order month	THD 95[%]	3차	5차	7차	9차	11차	13차	15차	17차
1월	61.94	43.25	36.77	18.79	13.25	4	3.72	5.17	5.34
2월	61.22	29	40.69	29.29	15	6.74	7.86	5.67	5.33
3월	68.73	39.8	40.64	31.27	16.57	8.2	9.3	7.45	5.1
4월	62.40	38.54	34	25.4	17.1	10.4	9.57	8.75	6.25
5월	60.75	34.87	35.4	26.33	16.5	9.22	8.38	7.69	6.47
6월	71.30	45.24	41.38	28.55	18	7.78	5.8	6.53	7
7월	70.09	49.25	39.42	22.93	17.3	5.83	3.74	5.8	5.1
8월	66.26	45.79	38.6	20.35	16.8	6	4.55	5.32	4.67
9월	58.56	40.29	31.58	17.31	13	5.73	4.67	5.67	4.82
10월	65.30	46.95	35.6	20.93	15	5.94	4.44	6.45	5.75
11월	61.78	44.27	34	19.29	14.77	5.46	4.67	5.95	4.83
12월	62.28	43.67	34.76	19.93	15.64	6.14	4.6	5.94	5.27

2.5 가전제품의 고조파 측정

가정집 부하에 쓰이고 있는 가전제품 중에서 컴퓨터, 핸드폰 충전기, 오디오, 세탁기, 냉장고를 대상으로 고조파 전류를 어느 정도 발생시키는 지 알아보았다.

표 4. 고조파 전류 왜형률

Table 4. Harmonic current THD

Harmonic order	컴퓨터	핸드폰 충전기	오디오	세탁기	냉장고
3	78.85	57.44	41.38	13.70	6.69
5	72.48	55.27	34.48	3.15	1.83
7	64.09	52.21	21.65	1.64	0.82
9	54.02	48.13	10.41	0.73	0.90
11	42.95	48.83	3.38	0.39	0.29
13	32.34	38.91	3.15	0.12	0.11
15	22.62	33.88	2.81	0.02	0.10
17	14.40	28.80	1.52	0.03	0.09
19	8.04	24.02	1.18	0.03	0.06

Harmonic order	컴퓨터	핸드폰 충전기	오디오	세탁기	냉장고
21	3.63	19.70	1.08	0.01	0.04
THDi[%]	149.0	133.3	59.3	14.2	7.1
Ii[mA]	298.0	50.24	158.8	1204.0	1397.5
S[VA]	117.8	18.4	32.0	277.5	307.7

주] I_i[mA]는 기본과 전류의 실효값,
S[VA]는 피상전력을 나타낸다.

아직 우리나라에서는 가전제품에 대한 고조파 규제가 없으나, 외국에서는 고조파 규제를 받고 있다[9].

3. 고조파 평가 및 분석

고조파 측정은 사례연구 수용가의 인입구에 설치된 전력량계 2차측에서 장비를 설치하여 이루어 졌다.

IEC 61000-3-2[9]에서 정의하고 있는 저압 및 중압 계통의 양립성 레벨(Compatibility level)과 비교하여 기준치를 초과하는지 살펴보기로 한다.

표 5. 고조파 전압 평가

Table 5. Harmonic voltage evaluation

order month	THD 95[%]	3차	5차	7차	9차	11차	13차	15차	17차
1월	3.52	2.46	1.028	0.752	2.025*	0.527	0.247	0.405*	0.368
2월	3.40	2.483	0.743	0.773	1.892*	0.537	0.263	0.425*	0.395
3월	3.41	2.426	0.698	0.784	1.974*	0.571	0.256	0.455*	0.34
4월	3.38	2.446	0.575	0.779	1.972*	0.526	0.246	0.414*	0.369
5월	3.50	2.509	0.648	0.749	2.039*	0.547	0.294	0.526*	0.383
6월	3.52	2.562	0.785	0.689	2.016*	0.513	0.273	0.506*	0.297
7월	3.67	2.694	0.782	0.649	2.066*	0.547	0.326	0.564*	0.39
8월	3.55	2.621	0.868	0.626	1.923*	0.54	0.347	0.569*	0.382
9월	3.49	2.562	0.73	0.648	1.933*	0.554	0.341	0.585*	0.39
10월	3.24	2.292	0.617	0.678	1.873*	0.567	0.298	0.52*	0.458
11월	3.25	2.275	0.838	0.57	1.961*	0.47	0.231	0.389	0.336
12월	3.41	2.581	0.773	0.854	1.806*	0.433	0.173	0.243	0.361
IEC	8.0	5.0	6.0	5.0	15	3.5	3.0	0.4	2.0

주] *는 기준치를 초과하는 값이다.

IEC 국제기준과 비교하여 보았을 때 기준을 초과하는 차수는 제 9차와 제 15차를 3배수인 영상전압이 약간 존재 하지만, 종합 왜형률은 기준치 8.0[%]보다 모두 낮게 나타나 문제가 없는 것으로 파악되었다.

고조파 전류 평가를 IEC 61000-3-6[10]에 의해 평가해 보고자 한다. IEC 국제기준은 고조파 전류에 대한 평가는 계획단계에서 검토하는 자료를 활용되고 규제는 없다.

IEC에서 규정하는 고조파 전류는 아래와 같이 정의된다.

$$I_h = \frac{I_{hi}}{I_n}$$

여기에 I_n [A]은 계약 전력에 상당하는 전류이고, I_{hi} 는 h차 고조파 전류값이다.

사례 수용가는 가정집으로 계약전력이 5[kVA]로 가정하면 다음과 같이 계산된다.

$$I_n = \frac{S[V A]}{V_n[V]} = \frac{5,000}{220} \cong 22.73 [A]$$

표 6. 고조파 전류 평가
Table 6. Harmonic current evaluation

order month	TDD	5차	7차	11차	13차
1월	6.41	3.79	2.92	0.76	0.87
2월	6.12	3.34	2.49	1.02	0.94
3월	5.40	3.15	2.34	0.82	0.74
4월	6.11	3.55	2.45	0.67	0.49
5월	4.99	2.81	1.63	0.42	0.27
6월	5.07	2.96	1.56	0.46	0.35
7월	4.56	2.46	1.35	0.45	0.36
8월	4.92	2.71	1.54	0.43	0.37
9월	4.93	2.75	1.58	0.49	0.36
10월	5.40	2.94	1.73	0.49	0.37
11월	4.93	2.93	1.49	0.32	0.30
12월	5.98	3.97	2.86	0.66	0.77
IEC 61000-3-6 limits[%]	6-8	5-6	3-4	1.5-3	1-1.5

표 6은 전류 왜형률(THD, 표 3)값을 종합 왜형률(TDD, Total Demand Distortion) 값으로 환산하여 적용한 것이다.

IEC에 의한 고조파 전류 평가 결과는 개별 차수뿐만 아니라 종합 왜형률도 모두 기준치를 초과하지 않아 아무 문제가 없다고 판단하였다. 하지만 고조파 전압 평가에서와 마찬가지로 3배수인 영상 전류는 표 5에서 알 수 있듯이 많이 포함되어 있다고 판단되었다.

4. 결 론

가정집 부하는 컴퓨터, 냉장고, 마이크로 오븐, TV 등 비선형 부하가 많아 고조파 발생이 심하고, 고조파가 시간에 따라 변하는 특성을 가지고 있다.

고조파 측정은 사례연구 가정집의 인입구에서 국제기준에 따라 측정하였다. 순시치 측정에 의한 결과는 전압 왜형률이 3.64[%]이었고, 일 년 동안의 95[%] 누적확률에 의한 결과는 3.24~3.67[%]이었다. IEC 기준치 8.0[%]보다는 낮게 측정되어 문제는 없지만, 영상 전압은 기준치를 약간 초과하여 영상 분에 대한 대책은 필요할 것으로 사료된다.

고조파 전류는 순시치에 측정에 의한 결과는 전류 왜형률이 49.31[%]이었고, 일 년 동안의 95[%] 누적확률에 의한 결과는 69.75~71.30[%]으로 차이가 나타났다.

국제기준(IEC 또는 IEEE)에 전류 평가는 THD가 아닌 TDD 개념으로 해야 한다. THD 60.75~71.30[%]가 TDD로 환산하면 전류 왜형률 변화는 4.56~6.41[%]가 되어 IEC 기준 6~8[%]보다 낮게 나타났다.

고조파 시뮬레이션은 고조파 문제를 파악, 분석하고 향후 고조파 대책 연구에 중요한 역할을 한다. 고조파 시뮬레이션에 필요한 데이터로 계통도, 선로데이터, 고조파 발생원을 측정하여 활용할 수 있도록 하였다.

사례연구 가정집 부하의 고조파 수준은 국제 기준에 의하여 평가해 본 결과 아직은 문제가 없는 것으로 파악되었다. 다만 영상 전압과 영상 전류는 기준치를 약간 초과하는 수준이었다. 향후 가정집 부하

연장 측정에 의한 일반 가정집 부하의 고조파 수준 조사

의 전기부하가 증가하고 고조파가 많이 발생하게 되면 우리나라도 외국과 같은 고조파규제에 대한 것을 고려해야 한다고 사료된다.

References

- [1] S. Jain and et al., "A survey of Harmonics", IEE India Annual Conference, 2004.
- [2] M. E. Tostes and et al., "Impacts Over the Distribution Grid From the Adoption of Distributed Harmonic Filter on Low-Voltage Customers, IEEE Trans. on Power Delivery, Jan. 2005.
- [3] 산업자원부 기술표준원, "저압 전기기기의 고조파 영향 평가 및 방출 한계기준에 관한 연구", 중간보고서, 2006.
- [4] IEC 61000-4-7, "General Guide on Harmonics and Inter-harmonics Measurement and Instrumentation for Power Supply Systems", 1991.
- [5] BMII-PX5, "Basic Measuring Instrument Power Explorer", Dranez co., 2004.
- [6] PQM Manual, "Power Quality Monitoring System", Micro Power Co., 2006.
- [7] R. C. Dugan, and et al., "Electrical Power Systems Quality", McGraw-Hill Co., 2003.
- [8] IEEE Std P519A-1996, "Guide for Applying Harmonic Limits on Power Systems".
- [9] IEC 61000-3-2, "Assessment of Emissions Limits for Distorting Loads in LV Power Systems", 2005.
- [10] IEC 61000-3-6, "Assessment of Emission Limits for Distorting Lords in MV or Power System", 1996.

◇ 저자소개 ◇

김경철 (金慶哲)

1954년 1월 20일생. 1977년 홍익대학교 전기공학과 졸업. 1977~1982년 국방과학연구소연구원. 1982~1984년 NMSU 전기공학과 졸업(석사). 1984~1988년 UTA 전기공학과 졸업(박사). 1988~1991년 한국전기연구소 선임연구원. 1991년~현재 홍익대학교 전기공학과 교수.

오경훈 (吳京勳)

1982년 8월 8일생. 2008년 홍익대학교 전기공학과 졸업. 2008~현재 홍익대학교 대학원 전기공학과 석사과정.

최형범 (崔炯範)

1970년생 8월 6일생. 1999년 홍익대학교 전기공학과 졸업. 2007년~현재 홍익대학교 전력계통 연구실 박사과정.

홍사근 (洪思根)

1956년 5월 3일생. 1981년 홍익대학교 전자공학과 졸업. 홍익대학교 전기공학과 대학원 재학중. 현재 중앙건설 기술심의위원회 위원(2008~2009). 한국조명·전기설비 학회 평의원. (주)공간이엔지 대표이사/건축전기설비기술사.