Journal of the Korean Institute of Illuminating and Electrical Installation Engineers Vol. 22, No.4, pp. 100~106 April 2008 논문 22-4-13

현장 측정에 의한 가정집 부하의 고조파 특성에 관한 연구

(A Study on the Harmonic Characteristics of Typical Household Loads by Field Measurements)

김경철* · 오경훈 · 최형범
(Kyung-Chul Kim · Kyung-Hoon Oh · Hyoung-Bumb Choi)

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 가정집 부하의 고조파 현장 측정과 EDSA 프로그램을 사용한 고조파 시뮬레이션을 심도 있게 다루고자 하였다.

Abstract

Typical household load 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 probablistic 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 and harmonics simulation using EDSA program for the case study.

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

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 예방할 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 의

* 주저자 : 홍익대학교 전기공학과 교수
Tel : 041-860-2568, Fax : 041-863-7605
E-mail : yangjier@hongik.ac.kr
접수일자 : 2007년 12월 28일
1차심사 : 2008년 1월 7일
심사완료 : 2008년 1월 17일

해서 발생된 것 뿐만 아니라 전력계통에서 발생한 외란에 의해 발생한다. 가정집은 수용가의 전선 설계와 사용하는 전기설비 또는 부하 형태에 따라서 전기 품질에 영향을 받는다.

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

본 논문에서는 가정집 부하의 고조파 특성을 파악하기 위해서 국제기준에 의거한 고조파 측정과 분석을 하고, 컴퓨터 시뮬레이션으로 고조파 전압과 전류를 예측하고자 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.

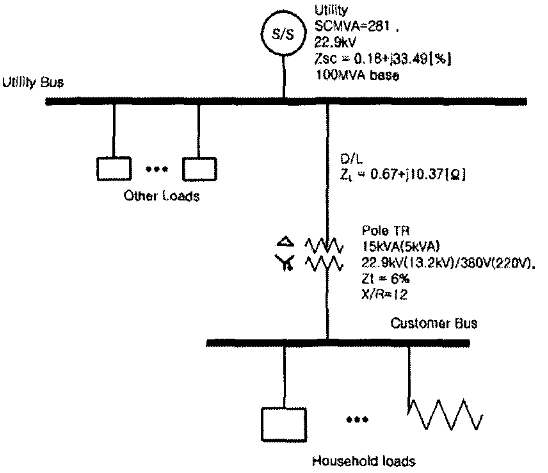


그림 1. 사례 연구 시스템의 단선도
Fig. 1. One-line diagram of the case study system

배전선로의 임피던스는 전력 케이블 특성과 수용가까지의 선로 구성 등 여러 가지 요인으로 구하기 가 어렵다. 동일 조건의 고조파 시험을 하기 위한 기준 임피던스(Reference impedance)를 각 국마다 정하여 사용하고 있다. 우리나라에서 제시한 임피던스는 0.67+j0.37[Ω]이고, 본 논문에서도 고조파 시뮬레이션에 사용하고자 한다[1].

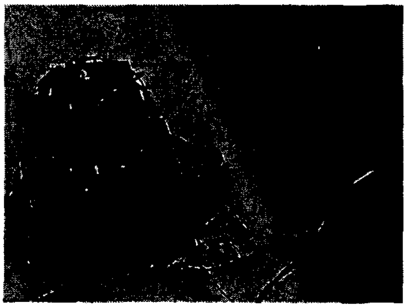
주상변압기는 단상 13.2[kV]/220[V], 5[kVA]이고, 임피던스는 6[%], X/R=12로 간주한다. 그림 1에서 고조파 시뮬레이션할 때는 3상으로 하고, 22.9[kV]/380[V], 15[kVA], Z_t=6[%], X/R=12으로 한다.

2.2 고조파 측정 장비

고조파 측정은 사례연구 수용가의 인입구에서 이루어졌다.

고조파는 시간에 따라 변하므로 IEC 61000-4-7[2]에 따라 측정시간을 순시치(Snapshot)과 10분(Short time)으로 한다.

(a) BMI-PX5



(b) PQM

그림 2. 측정 장비
Fig. 2. Measuring equipment

고조파 측정장비는 순시치 측정용으로 BMI-PX5 [3], 10분 측정용으로 PQM 장비[4]가 사용되었다. BMI-PX5는 윈도우 크기가 12사이클로 측정하고, PQM 장비는 매 6초마다 6사이클 측정하여 10분에 100개의 데이터 중에서 최소, 평균, 최대 등 대표값들을 저장한다.

2.3 순시치 측정

BMI-PX5 장비로 측정한 전압과 전류의 파형은 그림 3과 같다.

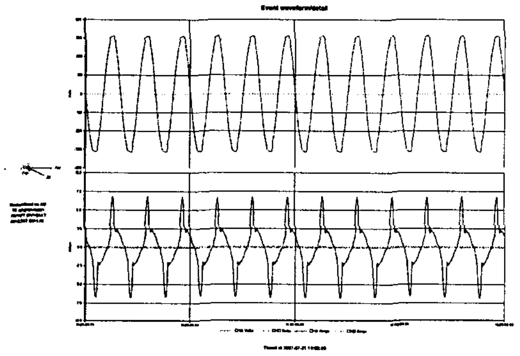


그림 3. 측정된 전압 및 전류 파형
Fig. 3. Measured voltage and current waveforms

표 1은 고조파 전압과 전류를 차수별 고조파 왜형률(THD, Total Harmonic Distortion)과 위상각을 간추려 놓은 것이다.

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[5].

PQM 장비로 한 달 동안 측정한 전압, 전류, 역률, 피상 전력의 시간 경향을 그림 4~7까지로 요약한다.

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

그림 5에서 실효치 전류는 1~3[A] 사이로 기본부하로 추정되는 1[A]와 아침부터 저녁까지 부하 변동이 있고 3[A]까지 올라간다. 역률의 변화는 80~

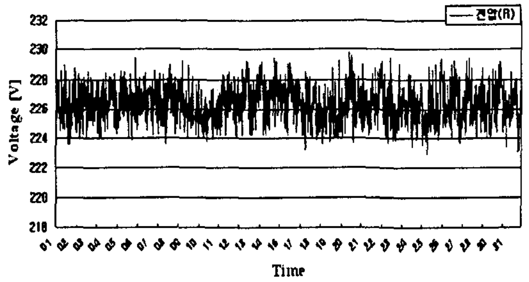


그림 4. 측정된 전압의 시간 경향
Fig. 4. Measured voltage time trends

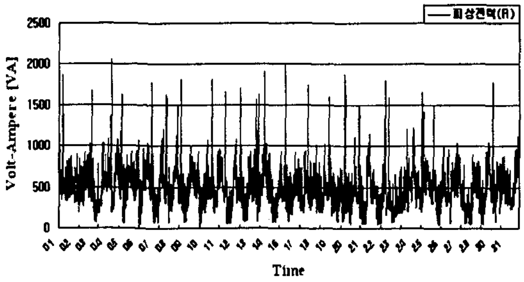


그림 7. 측정된 피상전력의 시간 경향
Fig. 7. Measured apparent power time trends

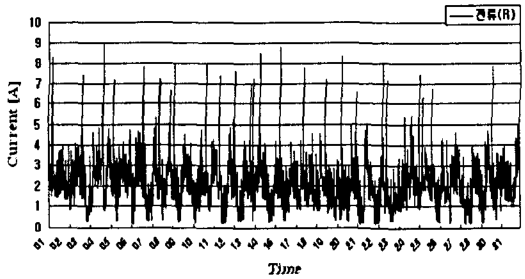


그림 5. 측정된 전류의 시간 경향
Fig. 5. Measured current time trends

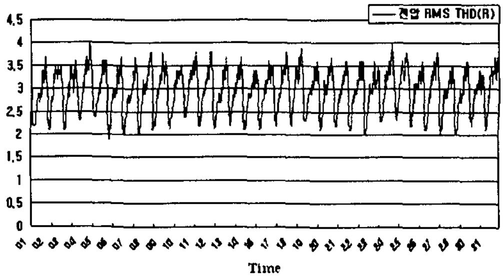


그림 8. 측정된 전압 왜형률의 시간 경향
Fig. 8. Measured voltage THD time trends

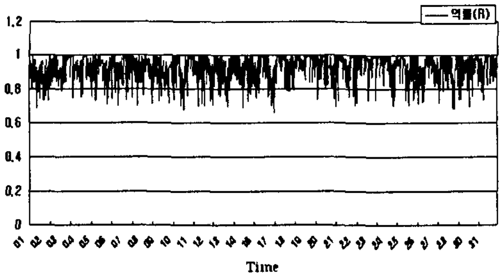


그림 6. 측정된 역률의 시간 경향
Fig. 6. Measured power factor time trends

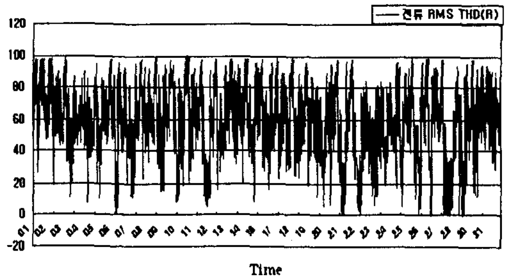


그림 9. 측정된 전류 왜형률의 시간 경향
Fig. 9. Measured current THD time trends

100[A]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 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 사용한다. 95[%]는 누적확률 값이 측정 기간 동안의 대표값으로 간주되고, 99[%]는 최대값으로 쓰이고 있다[6].

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

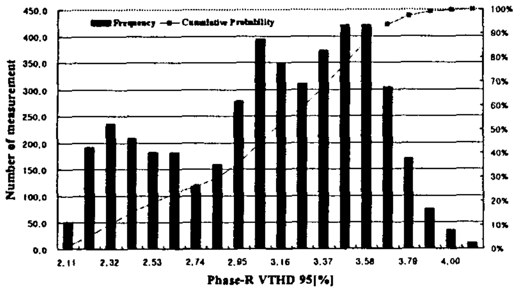


그림 10. 측정된 전압 왜형률의 누적 분포도
Fig. 10. Measured voltage THD cumulative probability distribution

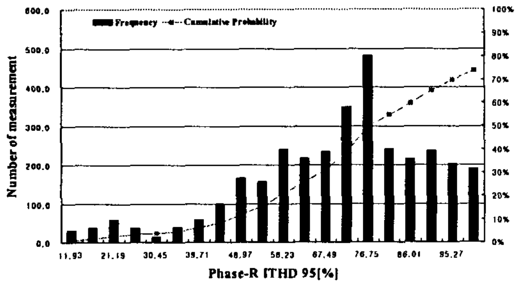


그림 11. 측정된 전류 왜형률의 누적 분포도
Fig. 11. Measured current THD cumulative probability distribution

표 2는 PQM 장비로 한 달 동안 측정한 전압 왜형률의 누적확률 값을 간추려 놓은 것이고, 표 3은 전류 왜형률의 누적확률 값이다.

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

Order	95[%] CP	99[%] CP
3	2.426	2.651
5	0.698	0.796
7	0.784	0.926
9	1.974	2.126
11	0.571	0.699
13	0.256	0.322
15	0.455	0.619
17	0.34	0.443
THD_V[%]	3.50	3.70

표 3. 전류 왜형률의 누적확률 값
Table 3. Cumulative probability values for current THD

Order	95[%] CP	99[%] CP
3	34.87	59.25
5	35.4	54.43
7	26.33	38.5
9	16.5	23.56
11	9.22	14.29
13	8.38	12.7
15	7.69	10.75
17	6.47	9
THD_I[%]	60.75	94.70

2.5 고조파 분석

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

고조파 전압 왜형률의 시간 경향 변화(그림 8)는 약 2.0~3.5[%]으로 부하가 많을 때는 3.5[%] 정도이고, 부하가 적을 때는 2.0[%]이었다.

IEC 61000-3-2[7]에서 정의하고 있는 저압 및 중압 계통의 양립성 레벨(Compatibility level)과 비교하여 기준치를 초과하는지 살펴보기로 한다.

표 4. 고조파 전압 평가
Table 4. Harmonic voltage evaluation

Order	IEC61000-3-2 limits[%]	순시측정	95[%]누적확률
3	5.0	2.619	2.426
5	6.0	0.813	0.698
7	5.0	0.506	0.784
9	1.5	1.841*	1.974*
11	3.5	0.653	0.571
13	3.0	0.325	0.256
15	0.4	0.650*	0.455*
17	2.0	0.425	0.340
THD_V[%]	8.0	3.638	3.50

주] *는 기준치를 초과하는 값이다.

IEC 국제 기준과 비교하여 보았을 때 기준을 초과하는 차수는 제9차와 제15차로 3배수인 영상 전압이 약간 존재하지만, 종합 전압 왜형률은 순시치 3.64[%], 95[%] 누적확률치 3.50[%]으로 기준치 8.0[%] 이하로 나타났다.

고조파 전류 왜형률의 시간 경향(그림 9)은 약 40~80[%]으로 나타났다. 부하가 많을 때는 약 80[%]까지 증가하였고, 부하가 적을 때는 약 40[%]이었다. 일반적인 가정 부하의 전압 왜형률이라 판단되며 사례연구 수용가는 전기를 약 600[VA] 소모하는 작은 부하였다.

3. 고조파 시뮬레이션

고조파 시뮬레이션은 고조파 문제를 파악하고 분석하는데 중요한 역할을 한다. 캐패시터 뱅크를 설치하고자 할 때, 고조파 발생장비를 설치하고자 할 때, 고조파 필터를 설치하고자 할 때 등 고조파 시뮬레이션은 여러 가지 조건하에서 가능한 해결 방안과 유효성을 평가하는 수단으로 쓰인다.

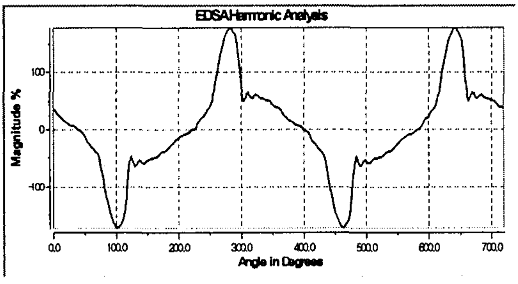


그림 12. EDSA 시뮬레이션에 의한 전류 파형
Fig. 12. Current waveform by EDSA simulation

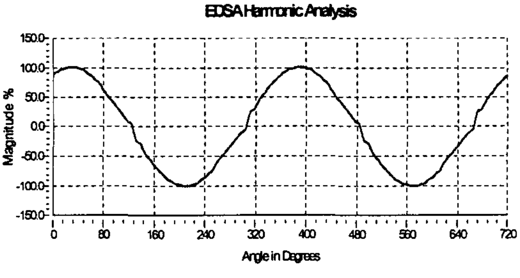


그림 13. EDSA 시뮬레이션에 의한 전압 파형
Fig. 13. Voltage waveform by EDSA simulation

고조파 시뮬레이션은 상용화된 EDSA[8] 프로그램을 사용하였다. BMI-PX5 장비로 측정한 전류를 고조파 발생원으로 하여 고조파 시뮬레이션을 한다.

그림 12는 EDSA로 시뮬레이션한 전류 파형이고, 그림 13은 수용가 모선의 전압 파형이다.

표 5는 순시치 측정에 의한 고조파 전류값과 EDSA로 시뮬레이션한 고조파 전류를 비교한 것이다.

표 5. 고조파 전류 비교
Table 5. Harmonic current comparison

차 수	측 정	시뮬레이션
1	100.0	100.0
2	1.341	1.34
3	37.372	37.37
4	0.9	0.90
5	26.428	26.43
6	0.847	0.85
7	13.956	13.96
9	7.538	7.54
11	3.191	3.19
13	4.766	4.77
15	4.175	4.18
17	2.091	2.09
19	2.163	2.16
21	2.681	2.68
23	2.466	2.47
25	1.509	1.51
27	1.231	1.23
29	1.35	1.35
THD_i[%]	49.309	49.28

고조파 전류원을 고조파 발생원으로 하였으므로 측정 값(49.309[%])과 시뮬레이션 값(49.28[%])은 거의 오차가 없는 결과로 나타났다.

표 6은 순시치 측정에 의한 고조파 전압 값과 EDSA로 시뮬레이션한 고조파 전압을 비교한 것이다.

표 6의 결과 측정한 고조파 전압 왜형률은 3.638[%]이고, 시뮬레이션한 값은 3.52[%]으로 차이가 크지 않으나 각 차수별은 오차가 약간 발생하였다. 고조파 발생원을 전류원으로 한 것도 오차의 원인이다. 일반적으로 고조파 발생원은 전류와 전압의 혼합원이므로 고조파 차수별까지 일치하려면 많은 선행 연구가 필요하다고 사료된다.

표 6. 고조파 전압 비교
Table 6. Harmonic voltage comparison

차 수	측 정	시뮬레이션
1	100.0	100.0
2	0.0	0.04
3	2.619	1.56
4	0.016	0.05
5	0.813	1.80
6	0.006	0.07
7	0.506	1.33
9	1.841	0.92
11	0.653	0.47
13	0.325	0.84
15	0.65	0.85
17	0.425	0.48
19	0.334	0.55
21	0.519	0.76
THDv[%]	3.638	3.52

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, 한 달 동안의 95[%] 누적확률에 의한 결과는 3.5[%]이었다. 일반적으로 순시치는 시간에 따라 변하는 부하에서는 값의 차이가 많이 있으므로 대표값이 될 수가 없다.

고조파 전류는 순시치에 측정에 의한 결과는 전류 왜형률이 49.31[%]이었고, 한 달 동안의 95[%] 누적확률에 의한 결과는 60.75[%]으로 차이가 나타났다. 사례연구와 같이 순시치 측정에 의한 고조파 평가는 오류를 범하기 쉬우므로 시간에 따라 변하는 고조파를 평가 하는데는 95[%] 누적확률 값으로 하면 통계자료에 의한 대표값이 되어 올바른 고조파 평가가 된다고 할 수 있다.

고조파 시뮬레이션은 고조파 문제를 파악하고 분석하는데 중요한 역할을 한다. 본 논문에서는 순시치로 측정한 고조파 전류를 고조파 발생원으로 하였고, 고조파 해석 프로그램인 EDSA를 이용하여 시뮬레이션 하였다. EDSA는 3상 시스템이고, 사례연구 가정집은 단상이므로 3상으로 변경하여 시뮬레이션 한 결과는 고조파 전류 왜형률은 측정값 49.31[%]과 시뮬레이션 값 49.28[%]이 거의 오차가 없었다. 수용가 인입구의 고조파 전압은 측정값 3.64[%]과 시뮬레이션 값 3.52[%]으로 약간 차이가 있었고, 각 차수별까지 일치시키려면 좀 더 많은 연구가 선행되어야 한다고 판단되었다.

References

[1] 산업자원부 기술표준원, "저압 전기기기의 고조파 영향 평가 및 방출 한계기준에 관한 연구", 중간보고서, 2006.
[2] IEC 61000-4-7, "General Guide on Harmonics and Inter-harmonics Measurement and Instrumentation for Power Supply Systems", 1991.
[3] BMI-PX5, "Basic Measuring Instrument Power Xplorer", Dranez co., 2004.
[4] PQM Manual, "Power Quality Monitoring System", Micro Power Co., 2006.
[5] R. C. Dugan, and et al., "Electrical Power Systems Quality", McGraw-Hill Co., 2003.
[6] IEEE Std P519A-1996, "Guide for Applying Harmonic Limits on Power Systems".
[7] IEC 61000-3-2, "Assessment of Emissions Limits for Distorting Loads in LV Power Systems", 2005.
[8] EDSA User's Guide, "Electrical Power System Harmonic Analysis Program", EDSA Micro Co., 2007.

◇ 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. 2008년~현재 홍익대학교 대학원 전기공학과 석사과정.

최형범 (崔炯範)
1970년생 8월 6일생. 1999년 홍익대학교 전기공학과 졸업. 2007년~현재 홍익대학교 전력계통 연구실 박사과정.