

교육용 건물의 GHP 냉/난방 부하의 고조파 특성에 관한 연구

(A Study on the Harmonic Characteristics of GHP Cooling/Heating Load in an Institutional Building)

김경철* · 오경훈 · 이규진

(Kyung-Chul Kim · Kyung-Hoon Oh · Kyu-Jin Lee)

요 약

GHP(Gas Heating Pump) 시스템은 가스 엔진으로 구동되는 압축기로 구성되는 효율적인 냉/난방기이고, 학교나 사무용 빌딩에 널리 쓰이고 있다. GHP는 느린 응답, 큰 시정수와 시간에 따라 변하는 시스템으로 제어하기가 어렵다. 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 GHP부하의 고조파 특성, IEC 61000-3-2에 의한 고조파 평가와 사례연구 시스템의 고조파 시뮬레이션 및 고조파 필터 적용을 심도있게 다루고자 하였다.

Abstract

The GHP(Gas Heat Pump) is an efficient cooling/heating system in which a compressor is driven by a gas engine and is brodening its application to the facilities such as schools and office buildings. It is difficult to control the GHP system because of slow response, big time constant and timevariant system. 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 probability approach is the most commonly used method to solve time varying harmonics. This paper provides an in depth analysis on harmonics field measurement of the GHP loads, harmonic assessment by IEC 61000-3-2, and harmonic simulation and harmonic filter application using EDSA program for the case study system.

Key Words : Gas Heat Pump, Harmonic Measurement, Harmonic Assessment, Harmonic Simulation, Harmonic Filter, IEC 61000-3-6

* 주저자 : 홍익대학교 전기공학과 교수
Tel : 041-860-2509, Fax : 041-863-7605
E-mail : yangjier@hongik.ac.kr
접수일자 : 2008년 11월 6일
1차심사 : 2008년 11월 7일
심사완료 : 2008년 12월 8일

1. 서 론

GHP 시스템은 가스엔진을 사용하기 때문에 고효율 냉/난방기로 학교, 건물등에 많이 쓰이고 있다. GHP는 실내기기의 배관길이, 열용량, 주변 온도 등

교육용 건물의 GHP 냉/난방 부하의 고조파 특성에 관한 연구

에 따라 특성이 달라지고 느린 응답으로 제어하기가 힘들다[1-2].

고조파원에 대한 정확하고 신뢰성 있는 측정과 평가는 전력시스템의 고장과 오동작 등을 예방할 수 있게 할 뿐 아니라 수용가와 전력회사의 역할과 책임을 분담하게 한다. 수용가는 할당된 범위 내에서 고조파 전류를 방출하여 전력 시스템의 전력 품질이 일정 수준 이상 유지되어야 하고, 전력회사는 고조파 전압이 일정 수준 이하가 되도록 유지시켜야 한다.

본 논문에서는 시간에 따라 변하는 GHP 부하의 고조파를 국제기준에 따라 측정하고, 국제기준에 의해 평가하며, 고조파 시뮬레이션으로 고조파 전압과 전류를 예측하고, 고조파 필터를 적용하여 고조파 저감 효과를 알아보려고 한다.

2. GHP 시스템

GHP시스템은 매우 효율적이기 때문에 학교 건물에 냉/난방기로 널리 쓰이고 있다[1-3].

난방의 원리는 가스엔진에 의해 압축기를 구동하고 냉매를 압축하여, 압축된 고온 고압의 냉매는 사방 밸브에 의해 냉매 흐름 방향이 바뀌어 실내 열교환기로 흡입된다. 실내 열교환기에서 냉매가스는 실내공기에 의해 냉각, 응축되며 이 때 난방이 된다. 응축된 냉매액은 실외 열교환기에서 실외 공기의 열을 흡수하여 증발되고 압축되는 과정을 반복한다.

냉방의 원리는 가스엔진에 의해 압축기를 구동하고 냉매를 압축하여, 압축된 고온 고압의 냉매 가스는 실외 열교환기에서 냉각, 응축된다. 응축된 냉매액은 실내 열교환기에서 실외 공기의 열을 흡수하여 증발하며 이때 냉방이 된다. 증발된 냉매가스는 다시 압축기로 흡입되어 압축되는 과정을 반복한다.

GHP시스템은 고효율, CO₂ 감소, 가스를 이용한 대체 에너지원 등 많은 장점을 가지고 있다. 따라서 GHP는 주로 큰 빌딩에서 온도 제어시스템으로 사용되고 있다.

GHP제어는 느린응답, 큰 시정수와 시간에 따라 변하는 시스템으로 어렵다. GHP특성은 실내외기의

배관 길이, 실 내외기의 열용량, 환경조건(주변온도 등)등에 따라 달라진다.

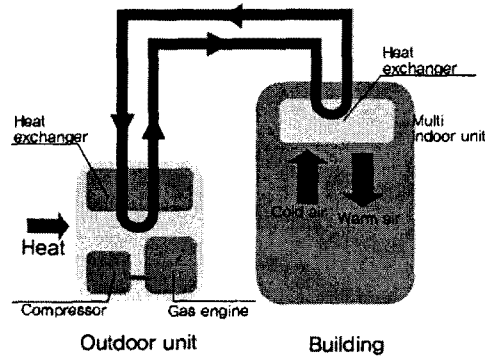


그림 1. GHP 시스템(난방)
Fig. 1. GHP system(Heating)

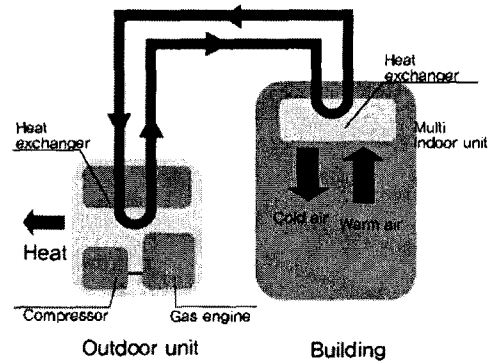


그림 2. GHP 시스템(냉방)
Fig. 2. GHP system(Cooling)

3. 고조파 측정

3.1 사례연구 시스템

그림 3은 사례연구 시스템의 단선도이다. 배전 변전소는 공급전압이 22.9[kV], 단락용량이 281[MVA], 단락 임피던스는 100[MVA]기준으로 0.18+j33.49 [%]이다.

사례 연구의 GHP부하는 홍익대학교 조치원 캠퍼스 A동 건물의 주변압기 2[MVA]에서 분리된 B동 건물의 2차 변압기 750[kVA]에 연결되어 있다. 주

변압기는 22.9[kV] 공급 전압으로부터 6.6[kV]으로 강압된다. 변압기 임피던스 $Z_A=6[\%]$, $X/R=12$ 으로 한다. 2차 변압기는 6.6[kV] 전압이 380[V] 전압으로 강압되어 GHP 부하에 공급된다. 변압기 임피던스는 주변압기와 같은 값으로 간주한다. GHP 모선에는 역률 제어용으로 120[kVA]의 커패시터와 7.2[kVA]의 리액터로 이루어진 커패시터 뱅크가 있다. 또한 B동 실험실에 전력을 공급하는 부하도 포함되어 있다.

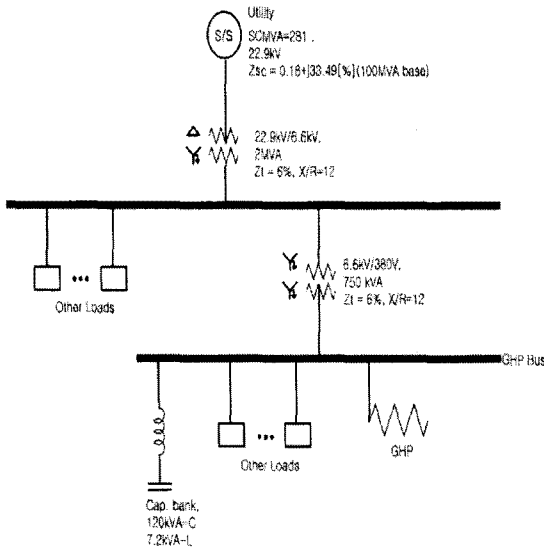
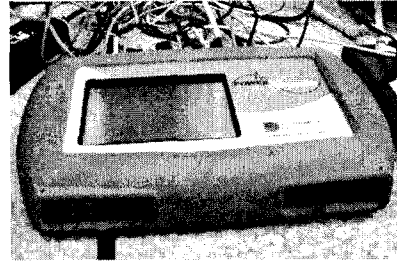


그림 3. 사례 연구 시스템의 단선도
Fig. 3. One-line diagram of the case study system

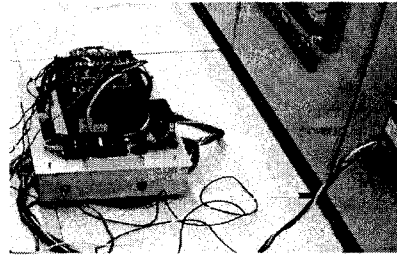
3.2 고조파 측정 장비

고조파 측정은 사례연구 시스템의 GHP 모선에서 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 [5], 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, 최대등 대표값을 저장한다.



(a) BMI-PX5



(b) PQM

그림 4. 측정 장비
Fig. 4. Measuring equipment

3.3 순시치 측정

표 1은 BMI-PX5 장비로 측정된 데이터를 요약한 것이다.

표 1. BMI-PX5에 의해 측정된 데이터
Table 1. Measured data by BMI-PX5

	A상	B상	C상
전압[V]	222.82	220.33	220.18
전류[A]	53.40	49.11	40.93
피상전력 [kVA]	35.54	32.46	27.04
역률[%]	97.0	96.0	94.0
전압왜형률 [%]	1.74	1.44	1.25
전류왜형률 [%]	15.42	17.48	20.85

그림 5는 측정된 전압 파형이고, 그림 6은 측정된 전류파형을 나타낸다.

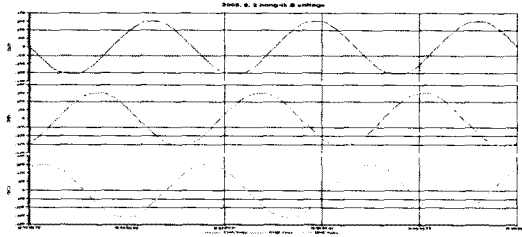


그림 5. 측정된 전압 파형(A, B, C 상)
Fig. 5. Measured voltage waveforms (Phase A, B, C)

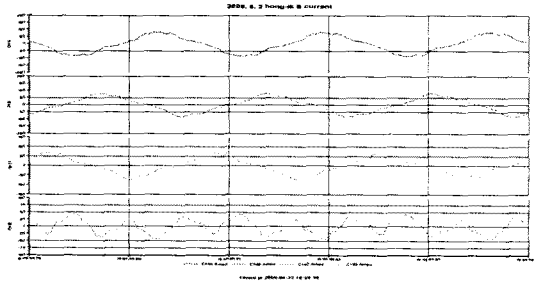


그림 6. 측정된 전류 파형(A, B, C, N 상)
Fig. 6. Measured current waveforms (Phase A, B, C, N)

표 2는 측정된 전압 왜형률(THD, Total Harmonic Distortion)의 크기와 위상을 차수별로 나타낸 것이고, 표 3은 측정된 전류왜형률의 크기와 위상이다.

표 2. 측정된 전압 왜형률
Table 2. Measured voltage THD

Harmonic order	A상		B상		C상	
	THD [%]	Phase [°]	THD [%]	Phase [°]	THD [%]	Phase [°]
1	100	0	100	121.0	100	240.0
2	0.05	171.71	0.038	69.88	0.025	285.75
3	0.844	246.39	0.666	215.35	0.334	328.69
4	0.016	320.34	0	206.09	0.006	264.18
5	1.238	170.15	0.984	153.39	0.9	161.98
6	0.041	61.31	0.038	276.21	0.034	172.93
7	0.509	225.96	0.4	255.14	0.444	248.84
8	0.025	214.56	0.041	86.19	0.028	356.28
9	0.269	183.38	0.234	294	0.244	217.38
10	0	358.79	0.003	263.88	0.003	221.74

Harmonic order	A상		B상		C상	
	THD [%]	Phase [°]	THD [%]	Phase [°]	THD [%]	Phase [°]
11	0.175	163.98	0.275	221.88	0.281	202.13
12	0.013	243.5	0.006	304.31	0.013	115.84
13	0.263	123.81	0.425	151.59	0.35	155.51
14	0.003	81.75	0	252.81	0	317.35
15	0.309	334.51	0.116	61.56	0.081	95.4
16	0.006	201.58	0.016	69.58	0.016	160.63
17	0.203	283.63	0.153	350.33	0.328	347.64
18	0.006	12.04	0.003	174.26	0.016	351.73
19	0.216	161.73	0.122	193.35	0.1	288.69
20	0.006	193.26	0.006	228.14	0.016	233.28
21	0.306	48.45	0.2	28.19	0.084	126.2
~						
50	0.006	48.14	0	310.44	0.003	157.03
THD _v [%]	1.74		1.43		1.24	

표 3. 측정된 전류 왜형률
Table 3. Measured current THD

Harmonic order	A상		B상		C상	
	THD [%]	Phase [°]	THD [%]	Phase [°]	THD [%]	Phase [°]
1	100	349.0	100	112.0	100	228.0
2	0.203	242.38	0.022	178.39	0.288	335.58
3	13.263	22.85	15.478	28.54	17.981	4.71
4	0.3	352.53	0.159	23.23	0.353	300.26
5	4.256	207.13	4.313	135.16	2.341	313.9
6	0.172	64.25	0.069	41.08	0.278	290.13
7	4.372	164.46	5.725	122.59	7.306	120.81
8	0.128	148.5	0.091	125.38	0.138	235.08
9	2.588	53.3	1.888	60.13	4.428	93.9
10	0.041	201.95	0.103	78.28	0.031	259.06
11	2.913	49.38	1.981	12.44	2.913	54.5
12	0.031	202.93	0.044	19.69	0.031	291.81
13	1.266	86.38	1.25	88.34	2.341	60.13
14	0.053	309.16	0.15	171.75	0.128	221.44
15	0.803	286.56	0.231	212.41	2.041	38.79
16	0.031	68.95	0.056	292.29	0.019	8.76
17	1.094	316.89	1.4	290.91	3.019	325.5

Harmonic order	A상		B상		C상	
	THD [%]	Phase [°]	THD [%]	Phase [°]	THD [%]	Phase [°]
18	0.041	151.72	0.034	53.08	0.116	243.41
19	0.322	235.14	0.159	256.63	1.706	308.94
20	0.019	241.45	0.056	142.88	0.159	165.29
21	1.234	316.48	1.1	320.44	0.309	23.31
~						
50	0.031	3.54	0.069	129.19	0.106	193.69
THD _r [%]	15.41		17.48		20.85	

3.4 10분 측정

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

고조파 수준을 파악하기 위하여 PQM 장비를 설치하여 일주일간 측정한 데이터를 정리하였다. 그림 7은 일주일 동안의 전압의 시간 경향을 나타내고, 그림 8은 전압왜형률의 시간 경향을 간추려 놓은 것이다. 그림 9는 일주일간의 전류의 시간 경향을 나타내고, 그림 10은 전류왜형률의 시간 경향을 간추린 것이다. 편의상 A상만 나타내었다.

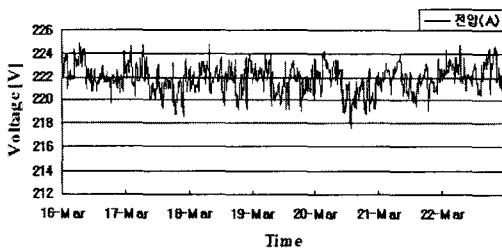


그림 7. 측정된 전압의 시간 경향
Fig. 7. Measured voltage time trends

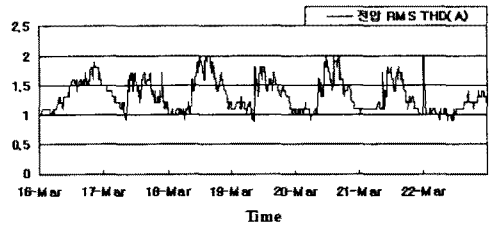


그림 8. 측정된 전압왜형률의 시간 경향
Fig. 8. Measured voltage THD time trend

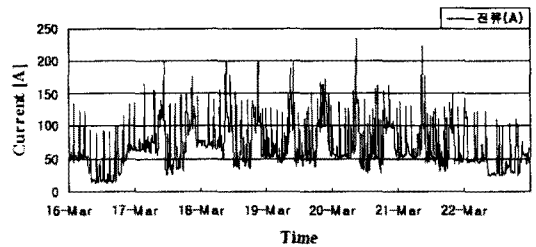


그림 9. 측정된 전류의 시간 경향
Fig. 9. Measured current time trend

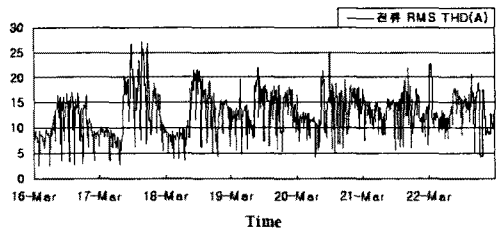


그림 10. 측정된 전류왜형률의 시간 경향
Fig. 10. Measured current THD time trends

그림 8과 그림 10에서 알 수 있듯이, 전압왜형률과 전류왜형률은 시간에 따라 변하는 특성을 가지고 있다. 이와같이 시간에 따라 변하는 고조파를 평가하기 위해서는 누적확률(CP, Cumulative Probability)을 사용한다. 95[%]는 누적확률 값이 측정기간 동안의 대표값으로 간주되고, 99[%]는 최대값으로 쓰이고 있다[8].

그림 11은 PQM 장비를 일주일 동안 측정한 전압 왜형률의 누적확률 분포도이고, 그림 12는 전류왜형률의 누적확률 분포도이다. 편의상 A상만 나타내었다.

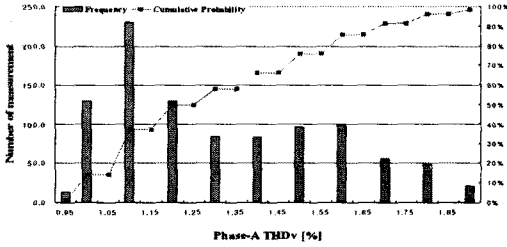


그림 11. 측정된 전압왜형률의 누적분포표
Fig. 11. Measured voltage THD cumulative probability distortion

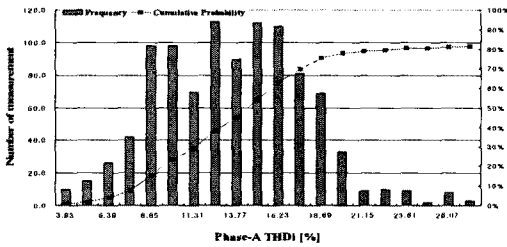


그림 12. 측정된 전류왜형률의 누적분포표
Fig. 12. Measured current THD cumulative probability distortion

표 4는 PQM 장비를 일주일 동안 측정한 전압왜형률의 누적확률 값을 간추려 놓은 것이고, 표 5는 전류왜형률의 누적확률 값이다. PQM 장비는 50차까지 측정하고 있으나, 여기서는 편의상 17차까지 나타내었다.

표 4. 전압왜형률의 누적확률 값
Table 4. Cumulative probability values for voltage THD

Order	A상	B상	C상
	95[%] [CP]	95[%] [CP]	95[%] [CP]
3	0.80	0.73	0.4
5	1.42	1.40	1.5
7	0.77	0.72	0.7
9	0.39	0.24	0.3
11	0.47	0.37	0.4
13	0.63	0.61	0.6
15	0.33	0.19	0.2
17	0.42	0.43	0.5
THDV[%]	1.80	1.70	1.7

표 5. 전류왜형률의 누적확률 값
Table 5. Cumulative probability values for current THD

Order	A상	B상	C상
	95[%] CP	95[%] CP	95[%] CP
3	16.24	21.15	22.7
5	14.35	13.85	17.0
7	7.07	9.50	11.3
9	4.07	5.46	6.9
11	5.36	6.17	8.1
13	3.69	4.27	6.6
15	1.82	1.86	3.2
17	2.77	2.70	7.8
THD[%]	19.60	24.80	31.4

4. 고조파 시뮬레이션

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

고조파 시뮬레이션은 상용화된 EDSA[9] 프로그램을 사용하였다. BMI-PX5 장비로 측정된 GHP 전류를 고조파 발생원으로 하여 고조파 시뮬레이션을 한다.

그림 13은 EDSA로 시뮬레이션한 GHP 부하의 전류 파형(GHP 전류)이고, 그림 14는 GHP 모선의 전압 파형이다. 편의상 A상만 나타내었다.

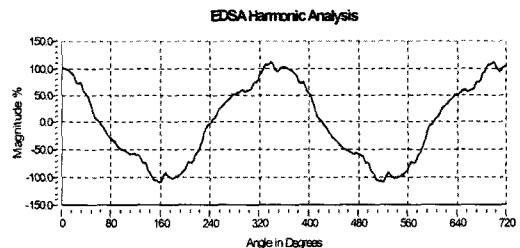


그림 13. EDSA 시뮬레이션에 의한 전류파형 (고조파 전류원)
Fig. 13. Current waveform by EDSA simulation(harmonic source)

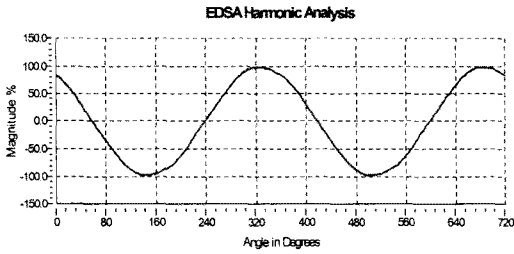


그림 14. EDSA 시뮬레이션에 의한 전압파형(GHP 모선)
Fig. 14. Voltage waveform by EDSA simulation(GHP bus)

표 6은 순시치 측정에 의한 고조파 전류값과 EDSA로 시뮬레이션한 고조파 전류를 비교한 것이다. 측정값의 크기가 0.2[%] 이상인 차수만 입력하였다.

고조파 전류원을 고조파 발생원으로 하였으므로 측정값과 시뮬레이션 값은 거의 오차가 없는 결과로 나타났다.

표 6. 고조파 전류 비교(GHP부하)
Table 6. Harmonic current comparison (GHP loads)

Harmonic order	A상		B상		C상	
	measured	simulated	measured	simulated	measured	simulated
1	100	100	100	100	100	100
2	0.203	0.20	0.022	15.48	0.288	0.29
3	13.263	13.26	15.478	4.31	17.981	17.98
4	0.3	4.26	0.159	5.73	0.353	0.35
5	4.256	4.37	4.313	1.89	2.341	2.34
6	0.172	2.59	0.069	1.98	0.278	0.28
7	4.372	2.91	5.725	1.25	7.306	7.31
8	0.128	1.27	0.091	0.23	0.138	4.43
9	2.588	0.80	1.888	1.40	4.428	2.91
10	0.041	1.09	0.103	1.10	0.031	2.34
11	2.913	0.32	1.981	0.74	2.913	2.04
12	0.031	1.23	0.044	0.39	0.031	3.02
13	1.266	1.04	1.25	0.76	2.341	1.71
14	0.053	0.86	0.15	0.29	0.128	0.31
15	0.803	0.68	0.231	0.43	2.041	0.23
16	0.031	0.42	0.056	0.23	0.019	0.58
17	1.094	0.42	1.4	0.32	3.019	0.19
18	0.041	0.65	0.034	0.22	0.116	0.28

Harmonic order	A상		B상		C상	
	measured	simulated	measured	simulated	measured	simulated
19	0.322	0.23	0.159		1.706	0.19
20	0.019	0.42	0.056		0.159	0.49
21	1.234	0.21	1.1		0.309	0.40
~						0.28
50	0.031	0.0	0.069	0.8	0.106	0.0
THD _v [%]	15.43	15.39	17.48	17.47	20.85	20.83

표 7은 순시치 측정에 의한 고조파 전압 값과 EDSA로 시뮬레이션한 고조파 전압을 비교한 것이다.

표 7. 고조파 전압 비교(GHP부하)
Table 7. Harmonic voltage comparison(GHP bus)

Harmonic order	A상		B상		C상	
	measured	simulated	measured	simulated	measured	simulated
1	100	100.0	100	100.0	100	100.0
2	0.05	0.01	0.038	0.01	0.025	0.01
3	0.844	0.16	0.666	1.41	0.334	0.17
4	0.016	0.01	0	0.01	0.006	0.01
5	1.238	1.69	0.984	0.08	0.9	1.08
6	0.041	0.01	0.038	0.01	0.034	0.01
7	0.509	0.12	0.4	0.15	0.444	0.17
8	0.025	0.01	0.041	0.01	0.028	0.01
9	0.269	0.03	0.234	0.03	0.244	0.01
10	0	0.01	0.003	0.01	0.003	0.01
11	0.175	0.03	0.275	0.03	0.281	0.51
12	0.013	0.01	0.006	0.01	0.013	0.01
13	0.263	0.05	0.425	0.05	0.35	0.01
14	0.003	0.01	0	0.01	0	0.01
15	0.309	0.03	0.116	0.03	0.081	0.01
16	0.006	0.01	0.016	0.01	0.016	0.01
17	0.203	0.06	0.153	0.03	0.328	0.01
18	0.006	0.01	0.003	0.01	0.016	0.01
19	0.216	0.04	0.122	0.01	0.1	0.01
20	0.006	0.01	0.006	0.01	0.016	0.01
21	0.306	0.03	0.2	0.01	0.084	0.02
~						
50	0.01	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
THD _v [%]	1.74	1.74	1.44	1.44	1.25	1.25

표 7은 순시치 측정에 의한 고조파 전압 왜형을 값과 EDSA로 시뮬레이션한 고조파 전압왜형을 값은 차이가 별로 없으나, 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.

5. 동조필터 적용

고조파 저감 기법으로 동조필터가 많이 쓰이고 있다. 그림 15는 동조필터의 구성을 보여주고 있다.

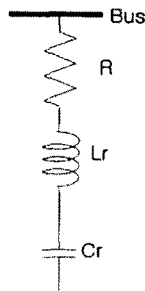


그림 15. 동조 필터
Fig. 15. A Single-tuned filter

동조필터는 리액터(Lr)과 콘덴서(Cr)가 직렬로 연결되어 있다. 동조 필터의 설계값은 부하에 따라 정해진다. 즉 제거하고자 하는 고조파 차수(h)에서 동조가 일어나도록 하면 된다.

$$h = \frac{1}{\omega_0 \sqrt{L_r C_r}} \quad (1)$$

여기서 ω_0 는 시스템 각주파수로 377[rad/s]이다.

부하의 주파수가 동조 주파수와 일치하면 동조 필터의 임피던스는 저항(R)이 작은 경우 거의 영이 된다. 따라서 동조 주파수의 전류는 동조 필터로 유입(sink)되는 원리이다.

고조파 전류 왜형률을 보면, 제3차, 제5차, 제7차 등 홀수차 고조파 함유율이 많으므로 제5차 동조 필터를 설계하여 설치 전, 후의 고조파 저감효과를 보고자 한다.

제5차 동조필터의 제원은, 먼저 저항 $R=0.01[\Omega]$, 인덕턴스 $X_L=0.5[\Omega]$ 으로 정하고, 커패시턴스 X_C 를 구하면 된다.

$$X_c = h^2 X_L = 5^2 \times 0.5 = 12.5[\Omega]$$

동조 필터의 적용은 고조파 해석 프로그램인 EDSA를 사용하여 시뮬레이션하였다.

그림 16은 제5차 동조 필터의 임피던스 응답곡선이다.

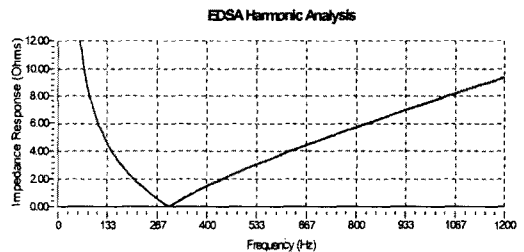


그림 16. 제5차 동조 필터의 임피던스 응답
Fig. 16. Impedance response of the 5th resonant filter

표 8은 동조 필터 설치 전, 후의 선로 전류 크기와 전류왜형을 비교이다.

표 8. 전류 크기 및 전류왜형률(GHP 선로)
Table 8. Current magnitude and THD(GHP branch)

		measured values	simulated value
A상	$I_A[A]$	53.40	54.63
	$I_{THD, A}[\%]$	15.42	15.39
B상	$I_B[A]$	49.141	50.07
	$I_{THD, B}[\%]$	17.48	17.47
C상	$I_C[A]$	40.93	41.97
	$I_{THD, C}[\%]$	20.85	20.83

동조 필터를 적용하면 GHP 선로전류 크기는 약 25.86[A] 감소하였고, 전류왜형률은 약 2.69[%]로 감소하였다.

표 9는 동조 필터 설치전, 후의 모선 전압 크기와 전압 왜형을 비교이다.

표 9. 전압 크기 및 전류왜형률(GHP bus)
Table 9. Voltage magnitude and THD(GHP bus)

		W / O	with the filter
A상	V _A [A]	215.94	215.94
	V _{THD, A} [%]	1.74	0.43
B상	V _B [A]	215.94	216.51
	V _{THD, B} [%]	1.44	0.31
C상	V _B [A]	215.36	215.94
	V _{THD, B} [%]	1.25	0.72

동조필터를 적용하면, GHP 모선 전압 크기는 약 215.75[V]에서 216.13[V]으로 약간 상승하고, 전압왜형률은 약 1.48[%]에서 0.49[%]로 많이 감소되었다.

6. 고조파 평가 및 분석

GHP 시스템은 380[V] 모선에 연결되어 있고, 학교의 다른 부하와 분리되어 있으므로 수용가의 고조파 평가는 IEC 61000-3-6[10]에서 정의하고 있는 저압 및 중압 계통의 양립성 레벨(Compatibility level)과 비교하여 기준치를 초과하는지 살펴보기로 한다.

표 10. IEC에 의한 고조파 전압 평가
Table 10. Harmonic voltage evaluation by IEC

Harmonic order	IEC 61000-3-6 limits[%]	순시측정			95% 누적확률		
		A상	B상	C상	A상	B상	C상
3	5.0	0.84	0.67	0.33	0.80	0.73	0.4
5	6.0	1.24	0.98	0.9	1.42	1.40	1.5
7	5.0	0.51	0.4	0.44	0.77	0.72	0.7
9	1.5	0.27	0.23	0.24	0.39	0.24	0.3
11	3.5	0.18	0.28	0.28	0.47	0.37	0.4
13	3.0	0.26	0.43	0.35	0.63	0.61	0.6
15	0.4	0.31	0.12	0.08	0.33	0.19	0.2
17	2.0	0.20	0.15	0.33	0.42	0.43	0.5
THDv[%]	8.0	1.74	1.43	1.24	1.80	1.70	1.70

IEC에 의한 고조파 전압 평가 결과는 IEC 기준치 8.0[%]보다 훨씬 적은 순시치는 약 1.47[%], 95[%] 누적확률값은 약 1.73[%]으로 나타났다.

표 11은 IEC 국제기준에 의한 고조파 전류 평가 결과이다.

표 11. IEC에 의한 고조파 전류 평가
Table 11. Harmonic current evaluation by IEC

Harmonic order	IEC 61000-3-6 limits[%]	순시측정			95% 누적확률		
		A상	B상	C상	A상	B상	C상
5	5-6	0.20	0.19	0.08	1.58	0.83	0.85
7	3-4	0.21	0.25	0.26	0.78	0.57	0.57
11	1.5-3	0.14	0.09	0.11	0.59	0.37	0.41
13	1-1.5	0.06	0.05	0.08	0.41	0.26	0.33
THDi[%]	6-8	0.72	0.75	0.75	2.16	1.49	1.57

IEC에서 규정하는 고조파 전류는 아래와 같이 정의된다.

$$I_h = \frac{I_{hi}}{I_n} \quad (2)$$

여기서 I_n[A]는 계약 전력에 해당하는 전류이고, I_{hi}는 h차 고조파 전류값이다.

GHP 모선은 750[kVA] 변압기이므로 다음과 같이 계산된다.

$$I_n = \frac{S_n}{\sqrt{3} V_n} = \frac{750,000}{\sqrt{3} \times 380} \approx 1,139[A]$$

표 11은 전류왜형률(THD, 표 3)값을 종합왜형률(TDD, Total Demand Distortion) 값으로 환산하여 적용한 것이다.

IEC에 의한 고조파 전류 평가 결과는 개별 차수뿐만 아니라 종합왜형률도 모두 기준치를 초과하지 않아 아무 문제가 없다고 판단되었다. 하지만 측정기간 동안 GHP 부하는 약 30[kVA]으로 변압기 용량 750[kVA]에 비해 상대적으로 작아 고조파 문제가 없지만, GHP 부하가 증가하면 홀수차 고조파에 대한 대책이 요구될 것으로 판단되었다.

7. 결 론

GHP 부하는 냉/난방기로 학교 건물에 널리 사용되고 있다. 시간에 따라 GHP 부하 변동이 크고, 느린 응답 특성 때문에 고조파를 발생하게 한다.

고조파 평가 기준의 원칙은 전력회사는 고조파 전압이 일정 수준 이하가 되도록 해야 하고, 수용가는 할당된 범위 내에서 고조파 전류를 방출하여 전기 품질을 일정 수준 이상 유지해야 하는데 있다.

고조파 측정은 IEC 61000-4-7에 따라 순시치와 10분으로 측정하였다. 순시치 측정에 의한 GHP 모선에서 고조파 전압왜형률은 약 1.47[%]이었고, 95[%] 누적확률 값은 약 1.73[%]이었다. IEC 61000-3-6 기준인 8.0[%] 보다는 훨씬 낮은 수치였다. 순시치 측정에 의한 GHP 부하의 전류왜형률(THDi)은 약 17.91[%]이었고, 95[%] 누적확률 값은 약 25.29[%]이었다. 시간에 따라 변하는 고조파 평가는 종합왜형률(TDDi)로 환산하여 평가해야 하므로, 순시치의 전류 종합왜형률은 약 0.74[%]가 되고, 95[%] 누적확률 값은 약 1.74[%]가 된다. IEC 기준의 6~8[%] 보다는 작다. 하지만 변압기 용량 750[kVA]에 비해 GHP 부하는 약 30[kVA]으로 상대적으로 작기 때문에 GHP 부하 용량이 증가하면 흡수차 고조파 문제가 발생할 것으로 사료되었다.

고조파 해석 프로그램을 사용하여 GHP 부하의 고조파 시뮬레이션을 하였다. GHP 부하를 측정된 고조파 전류로 고조파 전류원으로 하여 사례 연구 계통도를 구성하였고, GHP 모선의 고조파 전압을 측정된 값과 거의 일치하는 값으로 시뮬레이션하였다. 또한 동조필터를 설치하여 고조파 저감 효과를 확인하였다. 동조필터를 작동하면 GHP 선로 전류는 약 25.86[A] 감소하였고, 전류왜형률은 약 2.69[%] 감소하였다. GHP 모선전압의 크기는 약 0.38[V] 상승하고, 전압왜형률은 약 1.48[%]에서 약 0.49[%]로 많이 감소되었다.

이 논문은 2009학년도 홍익대학교 학술연구진흥비에 의하여 지원되었음.

References

- [1] A. Toba, and et al., "PWM Rectifier with DC Reverse-blocking Diode for High-Reliability Generating Apparatus and Its Application to Gas Heat Pump System", IEEE Power Electronic and Motion Control Conference, 2006.
- [2] Y. Hasegawa, and et al., "Learning Predictive Control for GHP", IEEE Industrial Electronics Society, 2000.
- [3] <http://www.overseas.sanyo.com/>
- [4] IEC 61000-4-7, "General Guide on Harmonics and Inter-harmonics Measurement and Instrumentation for Power Supply Systems", 2002.
- [5] BMII-PX5, "Basic Measuring Instrument Power Xplorer", 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] EDSA User's Guide, "Electrical Power System Harmonic Analysis Program", EDSA Micro Co., 2009.
- [10] IEC 61000-3-6, "Assessment of Emissions Limits for Distorting Loads in LV Power Systems", 2005.

◆ 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 한국전기연구원 선임연구원. 1991년~현재 홍익대학교 전기공학과 교수.

오경훈 (吳京勳)

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

이규진 (李圭珍)

1984년 6월 22일생. 2009년 홍익대학교 전기공학과 졸업. 2009년~현재 홍익대학교 대학원 전기공학과 석사과정.