

실측에 의한 특고압 수용가의 고조파 평가에 관한 연구

(A Study on the Harmonics Evaluation of Extra High Voltage Customers by Field Tests)

김경철* · 김유준

(Kyung-Chul Kim · You-June Kim)

요 약

전기료를 포함하는 비선형 부하를 가진 규모가 큰 제철소는 특고압 수용가이다. 이득 비선형 부하는 고조파 전류를 발생시키고, 전력계통의 전압을 왜곡시킨다. 고조파 측정결과로 고조파는 시간에 따라 변하는 특성을 가지고 있었다. 시간에 따라 변하는 고조파를 해결하기 위해 쓰이는 가장 보편적인 방법은 누적확률을 사용하는 것이다. 본 논문에서는 전기료 부하의 시간에 따라 변하는 고조파를 국제 고조파 기준인 IEC 61000-3-6, IEEE 519와 JIS C 61000-3-2에 의해 평가하고자 한다.

Abstract

A large steel industry which has nonlinear loads including electric arc furnaces is one of the extra high voltage customers. 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 propablistic approach is the most commonly used method to solve time varying harmonics. In this paper the time varying harmonics of electric arc furnace loads are evaluated by international harmonic standards(IEC 61000-3-6, IEEE 519 and JIS C 61000-3-2).

Key Words : Extra high voltage customers, Electric arc furnace loads, Time varying harmonics, Harmonics evaluation, Cumulative probability, IEC 61000-3-6, IEEE 519, JIS C 61000-3-2

1. 서 론

특고압 수용가 중에서 고조파 발생이 심한 제철소 부하를 사례연구 시스템으로 한다. 제철소는 전기료를 포함한 비선형 부하가 주 전기설비이기 때문에

근본적으로 고조파 발생원이라 할 수 있다. 또한 전기료의 특성상 부하가 급격하게 변하므로 고조파는 시간에 따라 변하고, 홀수차 고조파 뿐만 아니라 짝수차 고조파도 많이 포함하고 있다[1].

고조파원에 대한 정확하고 신뢰성 있는 측정과 평가는 전력 시스템의 고장과 오동작 등을 예방할 수 있게 할 뿐만 아니라, 공통결합점(PCC, the Point of Common Coupling)에서 수용가와 전력회사의 역할과 책임을 분담하게 한다. 수용가는 할당된 범위 내

* 주저자 : 홍익대학교 전기공학과 교수
Tel : 041-860-2568, Fax : 041-863-7605
E-mail : yangjier@hongik.ac.kr
접수일자 : 2006년 11월 9일
1차심사 : 2006년 11월 14일
심사완료 : 2006년 11월 29일

에서 고조파 전류를 방출하여 전력 시스템의 전력품질이 일정 수준 이상 유지되어야 하고, 전력회사는 공동결합점에서의 고조파 전압이 일정 수준 이하가 되도록 유지시켜야 한다.

본 논문에서는 유럽에서 주로 쓰이고 있는 IEC 기준, 북미에서 주로 쓰이는 IEEE 기준과 일본의 JIS 기준에 의거하여 특고압 수용가의 시간에 따라 변하는 고조파를 측정하고 평가하고자 한다.

2. 고조파 측정

2.1 사례연구 시스템

그림 1은 사례연구 수용가의 단선도이다. 변전소는 공급전압이 154[kV], 단락용량이 5954[MVA], 단락 임피던스는 100[MVA] 기준으로 $0.0018+j0.0167[pu]$ 이고 송전선로는 선로 임피던스가 $0.5184+j3.4641[\Omega]$ 이다. 수용가는 동력 부하용(#1 MTR) 95[MVA], 전기로/압연기용(#2 MTR, #3 MTR) $95[MVA] \times 2$ 등 3대의 주 변압기가 있다. 각 변압기는 154/22.9[kV], 임피던스는 11.5[%]이다. SVC는 90[MVAR]의 TCR(Thyristor Controlled Reactor)과 총 90[MVAR]인 4개(제2차, 3차, 4차 및 5차)의 고조파 필터로 구성되어 있다.

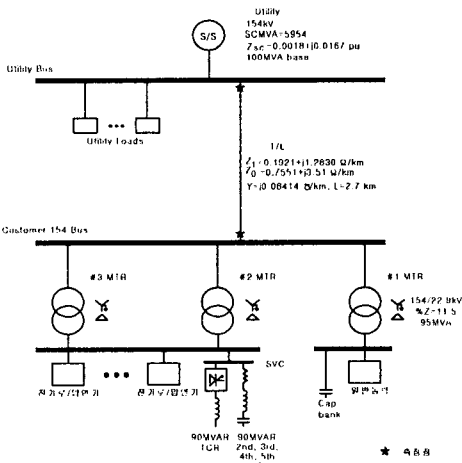


그림 1. 사례 연구 시스템의 단선도
Fig. 1. One-line diagram of the case study system

2.2 고조파 측정 장비

고조파 측정과 평가는 전력회사와 수용가가 만나는 점, 즉 공동결합점에서 이루어지는데, 사례연구 수용가의 모선(Customer Bus)이 된다.

고조파는 시간에 따라 변하므로 IEC 61000-4-7[2]에 따라 측정 시간을 3초(Very short time)로 한다.

고조파 측정장비는 PNA-2010[3]가 사용되었다. PNA-2010은 12사이클 측정에 36사이클 간격, 즉 0.8초에 한번씩 측정한다.

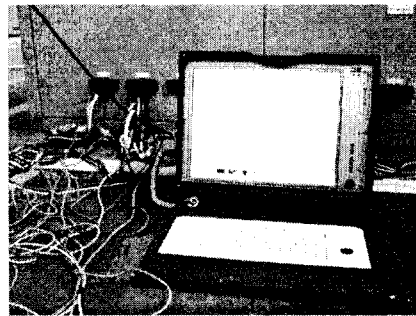


그림 2. 측정 장비
Fig. 2. Measuring equipment

2.3 3초 측정

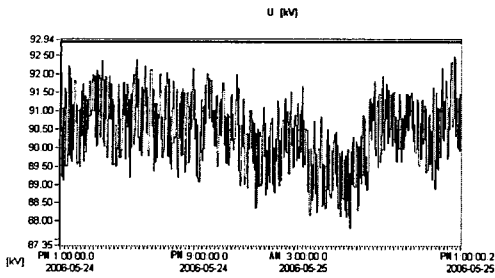
고조파가 시간에 따라 매우 빠르게 변하는 경우는 3초 측정을 권하고 있다. 3초 측정은 전기설비의 순간 영향이나 오동작을 일으키는 원인을 파악하는데 유용하게 쓰이고 있다.

PNA-2010 장비로 24시간 동안 측정된 데이터를 요약하면 표 1과 같다.

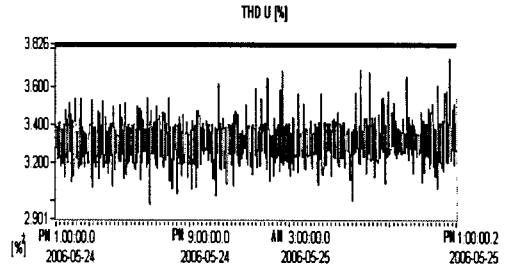
표 1. 측정된 데이터
Table 1. Measured data

	A 상 (mean)	B 상 (mean)	C 상 (mean)
전압[kV]	158.8	159.2	158.7
전류[kA]	0.41	0.42	0.44
유효전력[GW]	0.038	0.042	0.038
피상전력[GVA]	0.039	0.044	0.039

실측에 의한 특고압 수용가의 고조파 평가에 관한 연구

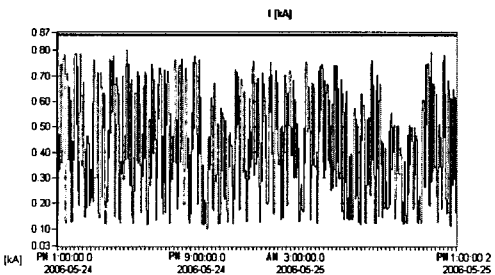


(a) 실효값

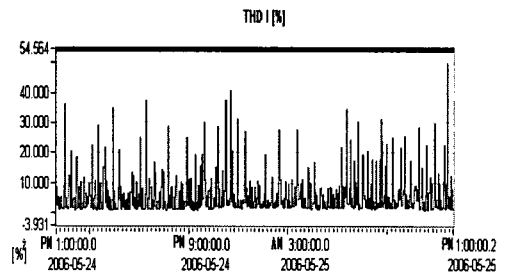


(b) 왜형률

그림 3. 측정된 전압 실효값과 왜형률의 시간경향
Fig. 3. Measured voltage magnitude and THD time trends

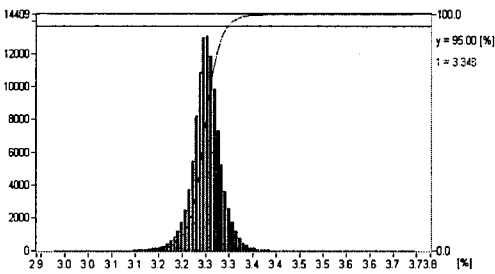


(a) 실효값

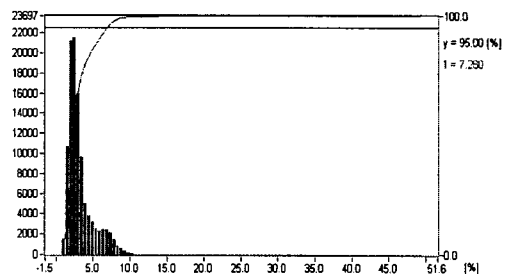


(b) 왜형률

그림 4. 측정된 전류 실효값과 왜형률의 시간경향
Fig. 4. Measured current magnitude and THD time trends



(a) 전압



(b) 전류

그림 5. 측정된 전압 및 전류 왜형률의 누적분포
Fig. 5. Measured voltage and current THD cumulative probability distribution

그림 3은 PNA-2010 장비로 24시간 동안 측정된 전압의 실효값과 왜형률로 편이상 3상 중 A상만 나타낸다.

그림 4은 PNA-2010 장비로 24시간 동안 측정된 전류의 실효값과 왜형률로 편이상 A상만 나타낸다.

그림 5는 PNA-2010장비로 24시간 동안 측정한

누적확률 분포도이고, 편이상 A상만 나타낸다.

3. 고조파 평가

고조파 평가는 IEC, IEEE와 JIS 기준에 따라 하기로 한다.

3.1 IEC에 의한 고조파 평가

특고압 수용가의 고조파 평가는 IEC 61000-3-6[4]에 따른다. 계획레벨(Planning level)은 전력회사가 채택하는 값이고, 부하유출 제한치를 결정하는데 사용된다.

실계통에서는 전력회사와 수용가가 연결되는 모선(Utility Bus)의 특성을 고려해야 한다.

$$E_{hi} = L_{hi} \cdot \sqrt{\alpha} \text{ of } \frac{S_i}{S_t} \quad (1)$$

여기 E_{hi} 는 수용가 i 에서 h 차 고조파에 대한 방출 한계이고, L_{hi} 는 계획레벨이다. α 는 합계지수(summation exponent), S_i 는 수용가의 용량 [MVA], S_t 는 모선에서 입력되는 전력의 합 [MVA]이나 출력되는 전력의 합 [MVA]이다.

IEC에서 권고하는 α 값은 표 2와 같다.

표 2. 합계지수
Table 2. Summation exponent

α	Harmonic order
1.0	$H < 5$
1.4	$5 \leq H \leq 10$
2.0	$H > 10$

사례연구 시스템의 전력회사 모선은 4개의 송전선로가 있다. 일주일 간의 전력흐름을 표 3에 간추려 놓았다.

표 3. 사례연구 시스템의 조류
Table 3. Power flows of the case study system

요일	사례연구 수용가 T/L	A T/L	B T/L	C T/L	소계 (mean MW)
월	85.6	17.9	63.0	22.6	189.1
화	55.1	17.7	60.9	22.7	156.4
수	93.3	17.3	62.1	22.8	195.5
목	92.6	16.7	61.0	23.0	193.3
금	105.8	17.4	62.2	23.4	208.8
토	95.7	17.6	62.6	23.3	199.2
일	87.4	17.2	61.8	22.9	189.3
일주일 (mean MW)	87.93	17.4	61.94	22.96	190.2

표 4는 IEC 61000-3-6을 적용한 고조파 전압 평가를 간추려 놓은 것이다. 전압 왜형률(THD, Total Harmonic Distortion)의 단위는 [%]이다.

표 4. IEC에 의한 고조파 전압 평가
Table 4. Harmonic voltage evaluation by IEC

harmonic order	IEC 61000-3-6		A 상	B 상	C 상
	L _{hi} planning levels[%]	E _{hi} limits[%]			
2	1.5	0.693	0.550	0.642	0.750*
3	2.0	0.925	0.316	0.380	0.444
4	1.0	0.462	0.761*	0.715*	0.828*
5	2.0	1.153	0.401	0.467	0.605
6	0.5	0.288	0.318*	0.300*	0.335*
7	2.0	1.153	0.208	0.270	0.324
8	0.4	0.231	0.134	0.123	0.204
9	1.0	0.576	0.186	0.212	0.273
10	0.4	0.231	0.114	0.097	0.140
11	1.5	1.020	0.341	0.305	0.470
12	0.2	0.136	0.097	0.088	0.096
13	1.5	1.020	0.118	0.123	0.225
14	0.2	1.136	0.091	0.088	0.096
15	0.3	0.204	0.080	0.115	0.109
16	0.2	0.136	0.096	0.092	0.101
17	1.0	0.680	0.105	0.102	0.125
18	0.2	0.136	0.058	0.054	0.061
19	1.0	0.680	0.080	0.071	0.100
20	0.2	0.136	0.063	0.060	0.068
21	0.2	0.136	0.063	0.079	0.080
22	0.2	0.136	0.067	0.065	0.074
23	0.7	0.476	0.072	0.085	0.089
24	0.2	0.136	0.051	0.050	0.056
25	0.7	0.476	0.059	0.076	0.080
~	~	~	~	~	~
THD[%]	3.0	-	1.290	1.366	1.649

주) *는 기준치를 초과하는 값을 나타낸다.

IEC에 의한 고조파 전압평가 결과는 IEC 기준치 3.0[%]보다 작지만, 개별 고조파에서는 제 4차, 제 6차의 짝수차 고조파는 기준치 보다 초과하는 값을 나타내었다. 계획레벨(L_{hi})을 적용하면 기준치 이하이지만 실계통을 고려한 기준치(E_{hi})를 적용하면 일

실측에 의한 특고압 수용가의 고조파 평가에 관한 연구

부 짝수차 고조파가 초과하는 것을 알 수 있다.

IEC에 의한 고조파 전류 평가는 계획레벨의 1단계에서 간략히 유출량을 판별하고 있다. 표 5는 고조파 전류 평가를 간추려 놓은 것이다.

표 5. IEC에 의한 고조파 전류 평가
Table 5. Harmonic current evaluation by IEC

Harmonic order	IEC limits I _{hi} /I _n [%]	A 상	B 상	C 상
5	5 - 6	2.248	2.270	2.031
7	3 - 4	2.130	1.900	1.940
11	1.5 - 3	1.403	1.420	1.302
13	1 - 1.5	0.778	0.846	0.850
$\sqrt{\sum I_k^2}$	6 - 8	8.275*	8.161*	8.040*

주) *는 기준치를 초과하는 값을 나타낸다.

IEC에 의한 고조파 전류 평가 결과는 개별 홀수차 고조파는 기준치를 초과하지 않았으나, 종합 왜형률은 기준치(6~8[%])보다 조금 높은 8.275[%], 8.161[%], 8.040[%]이었다. 홀수차 고조파만 비교한 것으로, 종합 왜형률에는 짝수차 고조파가 포함된 것으로 짝수차 고조파가 많이 있다고 볼 수 있다.

3.2 IEEE에 의한 고조파 평가

IEEE 519[5]에 따라 특고압 수용가의 고조파를 평가한다. IEEE에 의한 고조파 전압 평가는 전체 왜형률의 기준치는 2.5[%]이고, 개별 차수의 기준치는 1.5[%]이다. 표 4에서 실측치 값은 모두 IEEE 기준치 이하를 나타낸다. A상은 1.29[%], B상은 1.366[%], C상은 1.649[%]의 전압 왜형률이 측정되었다.

IEEE 519의 고조파 전류평가를 적용하려면 단락비(SCR, Short Circuit Ratio)를 구해야 한다.

단락 전류,

$$I_{sc} = \frac{5954 \text{ MVA}}{\sqrt{3} \times 154 \text{ kVA}} = 22,322 [\text{A}]$$

정격부하 전류,

$$I_L = \frac{285 \text{ MVA}}{\sqrt{3} \times 154 \text{ kVA}} = 1,068 [\text{A}]$$

단락비,

$$SCR = \frac{I_{sc}}{I_L} = 20.9$$

IEEE 519에서는 종합 왜형률(TDD, Total Demand Distortion)로 평가한다. 표 6은 고조파 전류 평가를 간추려 놓은 것이다.

표 6. IEEE에 의한 고조파 전류 평가
Table 6. Harmonic current evaluation by IEEE

Harmonic order	IEEE 519 limits	A 상	B 상	C 상
3	3.5	2.767	2.718	2.806
5	3.5	2.248	2.270	2.031
7	3.5	2.130	1.900	1.940
9	3.5	0.767	0.775	0.737
11	1.75	1.403	1.420	1.302
13	1.75	0.778	0.846	0.850
15	1.75	0.685	0.707	0.654
17	1.25	0.673	0.721	0.644
19	1.25	0.758	0.745	0.667
21	1.25	0.702	0.719	0.667
23	0.5	0.762*	0.797*	0.718*
25	0.5	0.741*	0.765*	0.681*
~	~	~	~	~
49	0.25	0.913*	0.925*	0.910*
TDD[%]	4.0	8.275*	8.161*	8.040*
TDDeven[%]	1.0	6.050*	5.950*	5.950*

주) *는 기준치를 초과하는 값을 나타낸다.

IEEE에 의한 고조파 전류 평가 결과는 기준치(4.0[%])보다 많이 초과하는 A상의 8.275[%], B상의 8.161[%], C상의 8.040[%]으로 나타났다. 특히 짝수차 고조파는 기준치(1.0[%])보다 훨씬 높은 A상의 6.05[%], B상의 5.93[%], C상의 5.95[%]으로, 고조파 필터 적용시 고려할 사항이다.

3.3 JIS에 의한 고조파 평가

일본에서는 수용가에 대한 고조파 관리 기준을 IEC 기준을 도입하여 일본 실정에 맞게 조정된 JIS

C 61000-3-2[6]을 적용하고 있다.

JIS 기준은 고조파 전압 평가를 하지 않는다. JIS에 의한 고조파 전류 평가를 표 7에 간추려 놓았다.

표 7. JIS에 의한 고조파 전류 평가
Table 7. Harmonic current evaluation by JIS

Harmonic order	JIS C 61000-3-2 limits[mA/kW]	A 상	B 상	C 상
5	0.25	0.147	0.153	0.141
7	0.18	0.139	0.128	0.135
11	0.11	0.092	0.096	0.090
13	0.09	0.051	0.057	0.059
17	0.07	0.044	0.049	0.045
19	0.06	0.049	0.050	0.046
23	0.05	0.050	0.054*	0.050
≥25	0.05	0.048	0.052*	0.047

주) *는 기준치를 초과하는 값을 나타낸다.

JIS에 의한 고조파 전류 평가의 특징은 일본 전력 계통에 적합하도록 규정되어 있다는 점이다. 짝수차 고조파는 고려하지 않는다. 홀수차 고조파도 제 5, 7 고조파만 기준치를 초과하지 않으면 허용하는 것으로 되어 있다.

4. 결 론

특고압 수용가인 제철소를 대상으로 고조파를 측정하고 평가하였다. 제철소는 전기로, 압연기 등 비선형 부하가 많아 고조파 발생이 많은 것으로 알려져 있다. 특히 부하 변동이 시시각각으로 일어나므로 고조파 측정은 3초 측정법을 사용하였고, 누적확률을 적용하여 평가하였다.

IEC에 의한 고조파 평가는 실제통의 조류를 고려함으로 현장 적용에 적합한 결과라 할 수 있다. 고조파 전압과 전류의 평가에서 제철소는 짝수차 고조파가 기준치를 초과하였다.

IEEE에 의한 고조파 전압 평가는 기준치 이하였으나, 고조파 전류 평가에서는 짝수차 고조파가 기준치를 많이 초과하였다. 고조파 전압과 전류 평가가 일치하지 않은 문제점은 좀 더 연구가 필요하다

고 사료된다.

JIS에 의한 고조파 평가는 전압에 대한 규제는 없고, 전류에 대한 권고 값만 있었다. 특히 일본에서 문제가 되는 제 5, 7 고조파만 권장 값을 넘지 않으면 수용가의 고조파 제한은 없다.

우리나라는 특고압 수용가에 대한 고조파 관리 기준을 제정하려는 과제를 수행하고 있다. 국제 고조파 관리 기준인 IEC, IEEE, JIS 등의 장단점을 보완하여 우리나라 실정에 맞는 관리기준이 필요하다고 판단된다.

향후 특고압 수용가에 대한 고조파 관리 기준에 대한 연구를 지속적으로 할 계획이다.

본 연구는 전력산업 연구개발사업으로 수행되었음.

References

- [1] L. Nikoloski and G. Rafajlovski, "Power Quality Aspects of Arc steel Melting Furnace", IEEE 10th Mediterranean Electrotechnical Conference, 2000.
- [2] IEC 61000-4-7, "General Guide on Harmonics and Inter-harmonics Measurement and Instrumentation for Power Supply Systems", 1991.
- [3] FNA 2010, "Power Network Analyzer", Chauvin Arnoux Co., 2004.
- [4] IEC 61000-3-6, "Assessment of Emissions Limits for Distorting Loads in MV or HV Power Systems", 1996.
- [5] IEEE Std. 519-1992, "IEEE Recommended Practice and Requirements for Harmonics Control in Electrical Power Systems".
- [6] JIS C 61000-3-2, "Guidelines to the control of harmonics by consumers of high or special high voltage power supply", 2005.

◇ 저자소개 ◇

김경철 (金慶哲)

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

김유준 (金有寬)

1982년생 7월 1일생. 2005년 홍익대학교 전기공학과 졸업. 2005년~현재 홍익대학교 대학원 전력계통 연구실 석사과정.