

# 전기로 부하의 고조파 측정, 평가 및 동조필터 적용에 관한 연구

(A Study on the Harmonics Measurement, Assessment and Resonant Filter Application of the Electric Arc Furnace Loads)

김경철\* · 진성은 · 이주홍

(Kyung-Chul Kim · Seong-Eun Jin · Joo-Hong Lee)

## 요 약

규모가 큰 제철소는 전기로를 포함한 비선형 부하를 가지고 있다. 이들 비선형 부하는 고조파 전류를 발생 시키고, 전력 계통의 전압을 왜곡시킨다. 본 논문에서는 전기로 부하의 고조파 현장 측정, 고조파 저감을 위해 수용가 모선에 동조 필터 적용과 국제 고조파 관리 기준인 IEC 61000-3-6과 IEEE Std. 519에 의한 고조파 평가를 심도 있게 분석한다. 고조파 해석 프로그램인 EDSA는 사례연구에 시뮬레이션 도구로 사용되었다.

## Abstract

Large steel industries have nonlinear loads including electric arc furnaces. These nonlinear loads generate harmonic currents and create distortions on the sinusoidal voltage of the power system. This paper provides an in depth analysis on harmonics field measurement of the electric arc furnace loads, adding a single-tuned filter at the customer bus for reducing harmonic distortion and harmonics assessment by the international harmonic standards IEC 61000-3-6 and IEEE Std. 519. The EDSA program was used as a simulation tool for the case study.

Key Words : Electric arc furnace, Harmonics measurement, Harmonics assessment, Single-tuned filter, IEC 61000-3-6, IEEE Std. 519

## 1. 서 론

제철소는 전기로를 포함한 비선형 부하가 주 전기 설비이기 때문에 근본적으로 고조파 전류 발생원이라 할 수 있다. 또한 전기로의 특성상 부하가 급격하

게 변하므로 고조파는 시간에 따라 변하고, 흡수차 고조파뿐만 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 내에서 고조파 전류를 방출하여 전력 시스템의 전력

\* 주저자 : 홍익대학교 전기공학과 교수  
Tel : 041-860-2568, Fax : 041-863-7605  
E-mail : yangjier@hongik.ac.kr  
접수일자 : 2005년 11월 22일  
1차심사 : 2005년 11월 28일  
심사완료 : 2005년 12월 10일

품질이 일정 수준 이상 유지되어야 하고, 전력 회사는 공통결합점에서의 고조파 전압이 일정 수준 이하가 되도록 유지시켜야 한다.

본 논문에서는 고조파를 측정하고, 국제 고조파 관리 기준에 따라 평가하고자 한다. 평가 결과에 따라 기준치를 초과하는 경우에는 고조파 해석 프로그램을 사용하여 동조 필터를 설치한 후 고조파 저감 효과를 알아보고 고조파 관리 기준에 따라 재평가하고자 한다.

## 2. 고조파 측정

### 2.1 사례연구 시스템

그림 1은 사례 연구 수용가의 단선도이다. 변전소는 공급전압이 154[kV], 단락용량이 5954[MVA], 단락 임피던스는 100[MVA] 기준으로  $0.0018+j0.0167[pu]$ 이다.

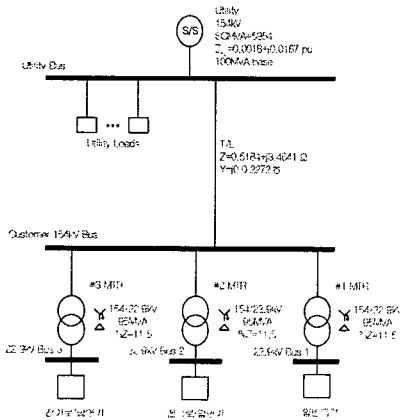


그림 1. 사례연구 시스템의 단선도  
Fig. 1. One-line diagram of the system under study case

송전선로는 선로 임피던스가  $0.5184+j3.4641[\Omega]$ 이고, 선로 어드미턴스는  $j0.2272[S]$ 이다.

수용가는 동력 부하용(#1 MTR) 95[MVA], 전기로/압연기용(#2 MTR, #3 MTR) 95[MVA]×2, 3대의 주 변압기가 있다. 각 변압기는 154/22.9[kV], 임피던스 11.5[%]이다.

### 2.2 고조파 측정 장비

고조파 측정과 평가는 사례연구 시스템의 수용가 22.9[kV] Bus2에서 이루어졌다.

고조파 측정 장비는 BMI 3030[2]가 사용되었다(그림 2).

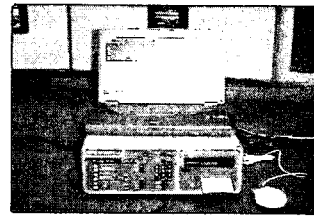


그림 2. 측정 장비  
Fig. 2. Measuring equipment

BMI 3030 장비로 측정된 순시치 데이터를 요약하면 표 1과 같다.

표 1. BMI 3030에 의해 측정된 데이터  
Table 1. Measured data by BMI 3030

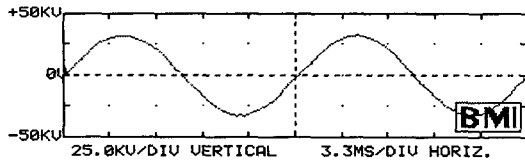
	A 상	B 상	C 상
전압[kVrms]	23.05	23.19	23.38
전류[A rms]	437.0	748.8	651.0
전압왜형률[%]	1.2	1.6	1.3
전류왜형률[%]	8.7	10.1	7.0
유효전력[MW]	5.817	9.615	7.928
무효전력[MVA]	1.912	3.160	2.605

그림 3은 측정된 전압 파형이고, 그림 4는 측정된 전류 파형이다.

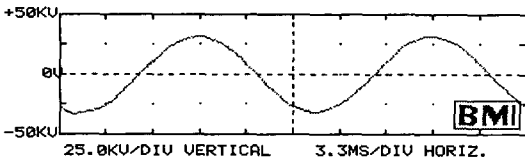
## 3. 고조파 평가

고조파 평가의 원칙은 전력회사와 수용가가 역할과 책임을 분담하는데 있다. 고조파 전압 평가는 IEC 61000-3-6[3]에 적용한다.

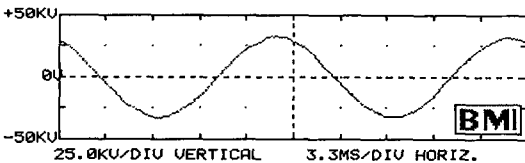
표 2는 고조파 전압 평가를 간추려 놓은 것이고, 그림 5는 그림으로 나타낸 것이다. 계획 레벨(planning level)은 전력회사가 채택하는 값이고, 부하 유출 제한치를 결정하는데 사용한다.



(a) A 상

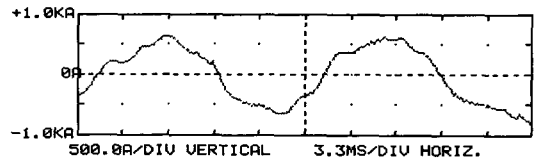


(b) B 상

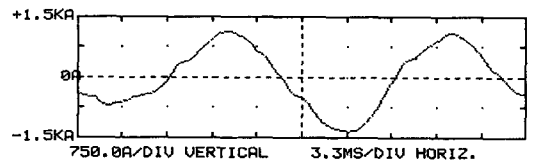


(c) C 상

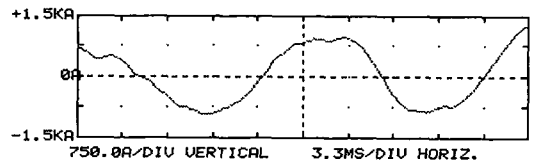
그림 3. 측정된 전압 파형  
Fig. 3. Measured voltage waveforms



(a) A 상



(b) B 상



(c) C 상

그림 4. 측정된 전류 파형  
Fig. 4. Measured current waveforms

표 2. 고조파 전압 평가  
Table 2. Harmonic voltage assessment

차 수	IEC 61000-3-6 planning levels	A상	B상	C상
2	1.6	0.1	0.4	0.2
3	4.0	0.4	0.9	0.6
4	1.0	0.4	0.3	0.4
5	5.0	0.7	0.9	0.6
6	0.5	0.4	0.0	0.3
7	4.0	0.5	0.5	0.5
8	0.4	0.1	0.1	0.3
9	1.2	0.0	0.1	0.0
10	0.4	0.0	0.0	0.0
11	3.0	0.3	0.4	0.4
12	0.2	0.0	0.1	0.2
13	2.5	0.0	0.2	0.2
14	0.2	0.0	0.0	0.0
15	0.3	0.0	0.0	0.0
16	0.2	0.0	0.0	0.1
17	1.6	0.0	0.0	0.0
~				
50	0.2	0.0	0.1	0.0
THD <sub>v</sub> (%)	6.5	1.2	1.6	1.3

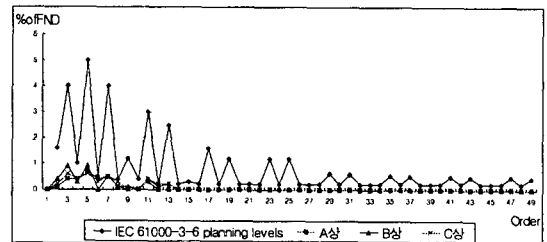


그림 5. 고조파 전압 평가  
Fig. 5. Harmonic voltage assessment

PCC에서의 전압 왜형률(THD, Total Harmonic Distortion)은 순시치 측정 결과 1.2[%], 1.6[%], 1.3[%]으로 IEC 61000-3-6 기준치(6.5[%])보다 낮아 고조파 규제 대상은 아니다.

고조파 전류 평가는 IEEE Std. 519-1992[4]를 적용한다. 기준을 적용하려면 먼저 단락비(SCR, Short Circuit Ratio)를 구해야 한다.

단락전류,

$$I_{sc} = \frac{95MVA}{\sqrt{3 \times 22.9kV \times 0.115}} = 20828 A$$

전기로 부하의 고조파 측정, 평가 및 동조필터 적용에 관한 연구

부하전류,

$$I_L = \frac{24.62MVA}{\sqrt{3} \times 22.9kV} = 620.7 A$$

단락비,

$$SCR = \frac{I_{SC}}{I_L} = 33.6$$

여기서  $I_L$ 은 수용가의 연간 평균 최대 전류여야 하지만, 측정시 3상 전력만 구할 수 있어 대신 사용하여 구하였다.

IEEE Std. 519에서는 종합 왜형률(TDD, Total Demand Distortion)로 평가하는데, 본 논문에서는 TDD 대신에 THD로 평가하여 다소의 차이는 발생할 수 있다. 즉 TDD는 최대 부하전류를 이용하고, THD는 측정 시 기본파 부하 전류를 이용하기 때문에 생기는 오차이다.

표 3-1. 고조파 전류 평가

Table 3-1. Harmonic current assessment

차 수	IEEE 519 limits	A상	B상	C상
3	7.0	5.9	6.7	4.4
5	7.0	3.5	4.8	2.9
7	7.0	1.5	1.7	1.3
9	7.0	0.3	0.3	0.5
11	3.5	0.2	0.4	0.0
13	3.5	0.4	0.4	0.3
15	3.5	0.1	0.2	0.0
17	2.5	0.2	0.0	0.1
19	2.5	0.2	0.0	0.1
21	2.5	0.1	0.1	0.0
23	1.0	0.2	0.0	0.1
25	1.0	0.2	0.0	0.0
~				
49	0.5	0.3	0.0	0.0
TDD(%)	8.0	8.7*	10.1*	7.0
TDD <sub>even</sub> (%)	2.0	5.0*	5.5*	4.3*

주] \*는 기준치를 초과하는 값을 나타낸다.

표 3-2. 짝수차 고조파 전류 왜형률

Table 3-2. Even harmonics current THD

차 수	A상	B상	C상
2	3.4	5.1	3.2
4	3.0	1.7	2.6
6	1.7	0.4	1.0
8	0.6	0.6	0.7
10	0.6	0.0	0.5
12	0.0	0.4	0.2
14	0.5	0.3	0.1
16	0.4	0.0	0.3
18	0.3	0.1	0.2
20	0.3	0.2	0.2
~			
50	0.2	0.0	0.0
TDD <sub>even</sub> (%)	5.0*	5.5*	4.3*

주] \*는 기준치를 초과하는 값을 나타낸다.

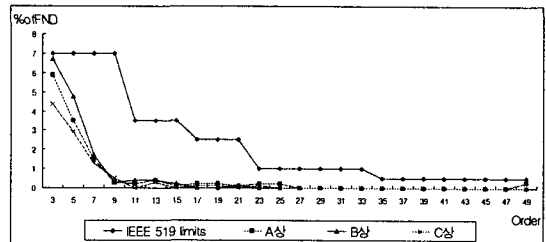


그림 6. 고조파 전류 평가

Fig. 6. Harmonic current assessment

표 3은 고조파 전류 평가를 간추려 놓은 것이다. 사례연구 수용가는 짝수차 고조파가 많아 표로 나타내었다. 그림 6은 그림으로 나타낸 것이다.

고조파 전류 평가 결과는 A상(8.7%)과 B상(10.1%)이 IEEE 기준치(8.0%)를 초과하고 있다. 특히 짝수차 고조파는 IEEE 기준치(2.0%)를 많이 초과(5.0%, 5.5%, 4.3%)한다. 고조파 함유율이 높은 제2, 3, 4, 5차 고조파 필터를 설치하면 효율적으로 고조파 관리를 할 수 있다.

#### 4. 동조 필터 적용

고조파 저감 기법으로 동조 필터가 많이 쓰이고

있다. 그림 7은 동조 필터의 구성을 보여주고 있다.

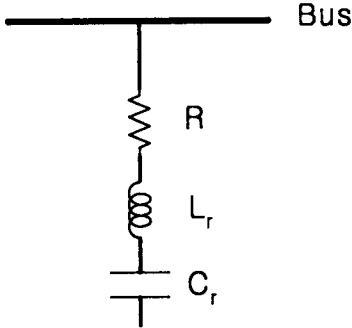


그림 7. 동조 필터  
Fig. 7. A single-tuned filter

동조 필터는 리액터(Lr)와 콘덴서(Cr)가 직렬로 연결되어 있다. 동조 필터의 설계 값은 부하에 따라 정해진다. 즉 제거 하고자 하는 고조파 차수(h)에서 동조가 일어나도록 하면 된다.

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

여기서  $\omega_0$ 는 시스템 각주파수로 377[rad/s]이다.

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

고조파 전류 평가 결과로 보면 제2, 3, 4, 5차 고조파가 함유율이 높으므로 제2, 3, 4, 5차 동조 필터를 설계하여 설치 전, 후의 고조파 평가를 하기로 한다.

제2차 동조 필터의 제원은, 먼저 저항  $R=0.001[\Omega]$ , 인덕턴스  $X_L=0.5[\Omega]$ 로 정하고 커패시턴스( $X_C$ )를 구하면 된다.

$$X_{C2} = h^2 X_L = 2^2 \times 0.5 = 2.0[\Omega]$$

마찬가지로 제3, 4, 5차 동조 필터의 제원을 구한다.

$$X_{C3} = h^2 X_L = 3^2 \times 0.5 = 4.5[\Omega]$$

$$X_{C4} = h^2 X_L = 4^2 \times 0.5 = 8.0[\Omega]$$

$$X_{C5} = h^2 X_L = 5^2 \times 0.5 = 12.5[\Omega]$$

동조 필터의 적용은 고조파 해석 프로그램인 EDSA[5]를 사용하여 시뮬레이션 하였다.

그림 8은 제5차 동조 필터의 임피던스 응답 곡선이다.

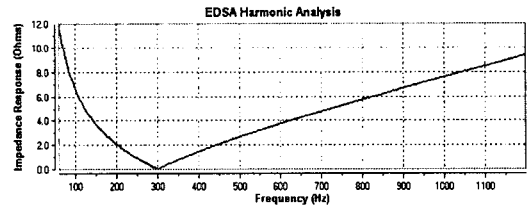


그림 8. 제5차 동조 필터의 임피던스 응답  
Fig. 8. Impedance response of the 5th resonant filter

그림 9는 EDSA로 시뮬레이션 한 동조 필터 설치 전의 전류 파형과 히스토그램이고, 그림 10은 EDSA로 시뮬레이션 한 제2, 3, 4, 5차 동조 필터 설치 후의 전류 파형과 히스토그램이다.

표 4는 동조 필터 설치 전, 후의 전류와 전류 왜형을 비교이다.

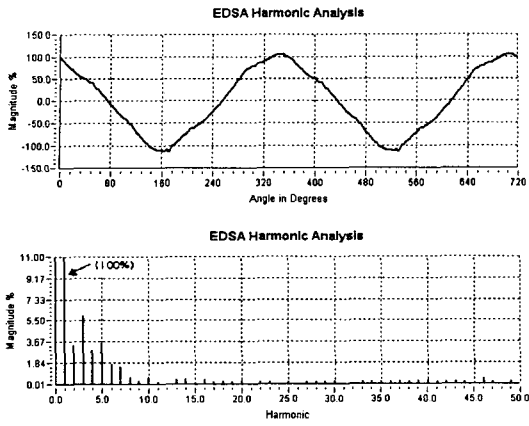
표 4에서 알 수 있듯이 EDSA 시뮬레이션은 실측치와 유사한 값으로 모의 되었다. 또한 동조 필터를 적용하면 전류 왜형률이 약 8.58[%]에서 2.27[%]로 많이 감소되었다.

표 4. 전류 및 전류 왜형률

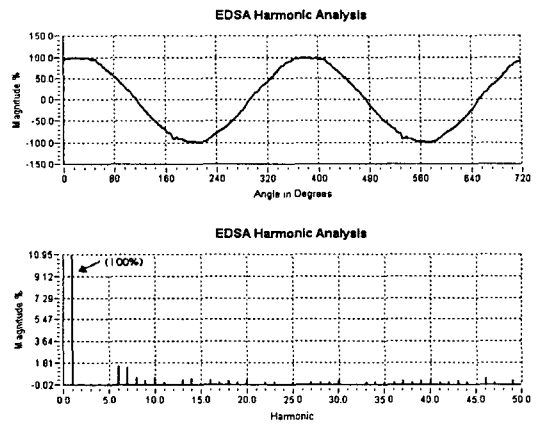
Table 4. Current magnitude and total harmonics distortion

		Measured values	Simulated values	With the filters
A 상	I <sub>A</sub> [A]	437.0	441.6	453.74
	I <sub>THD,A</sub> [%]	8.7	8.71	2.69
B 상	I <sub>B</sub> [A]	748.8	762.18	724.99
	I <sub>THD,B</sub> [%]	10.1	10.05	2.11
C 상	I <sub>C</sub> [A]	651.0	666.34	641.30
	I <sub>THD,C</sub> [%]	7.0	6.99	2.02

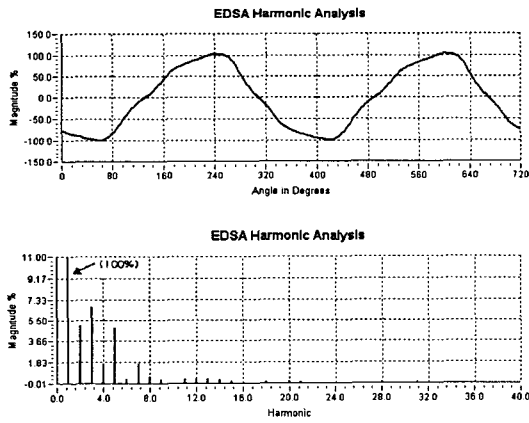
전기로 부하의 고조파 측정, 평가 및 동조필터 적용에 관한 연구



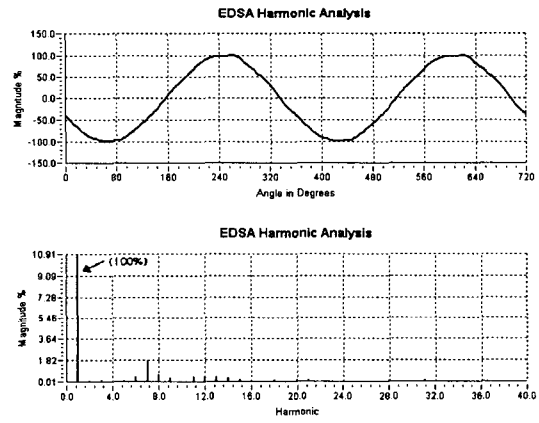
(a) A 상



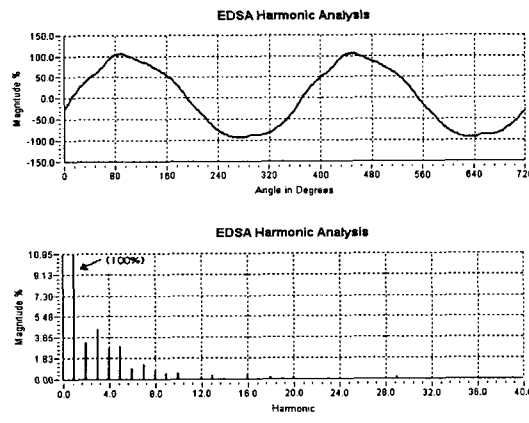
(a) A 상



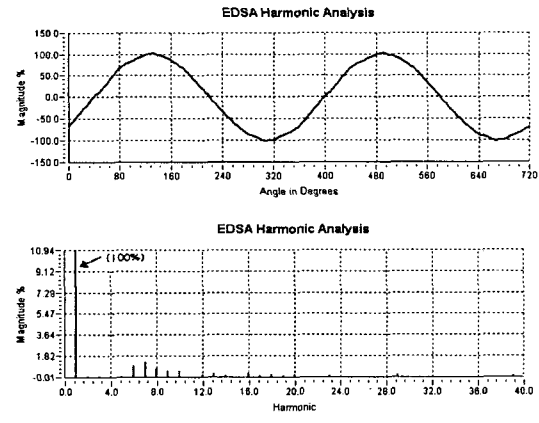
(b) B 상



(b) B 상



(c) C 상



(c) C 상

그림 9. 동조 필터 설치 전의 전류 파형 및 히스토그램  
Fig. 9. Current waveforms and histograms without the resonant filters

그림 10. 동조 필터 설치 후의 전류 파형 및 히스토그램  
Fig. 10. Current waveforms and histograms with the resonant filters

표 5는 동조 필터 설치 전, 후의 전압과 전압 왜형률을 비교이다.

표 5. 전압 및 전압 왜형률  
Table 5. Voltage magnitude and total harmonics distortion

		Measured values	Simulated values	With the filters
A상	V <sub>A</sub> [A]	23.32	23.055	23.054
	V <sub>THD,A</sub> [%]	1.2	1.22	0.42
B상	V <sub>B</sub> [A]	23.06	23.195	23.192
	V <sub>THD,B</sub> [%]	1.6	1.64	0.35
C상	V <sub>C</sub> [A]	23.34	23.385	23.383
	V <sub>THD,C</sub> [%]	1.3	1.35	0.40

동조 필터를 적용하면 모선의 전압 왜형률은 약 1.37[%]에서 약 0.39[%]로 많이 감소되었다.

동조 필터를 적용하였을 때의 고조파 전류를 IEEE Std. 519에 의해 평가하기로 한다. 표 6은 고조파 전류 평가를 간추려 놓은 것이다. 표 7은 짝수차 고조파 전류 왜형률에 대하여 나타내었다.

표 6-1. 고조파 전류 평가(A 상)  
Table 6-1. Harmonic current assessment(phase A)

차 수	IEEE 519 limits	Measured values	Simulated values	With the Filters
3	7.0	5.9	5.9	0.06
5	7.0	3.5	3.5	0.04
7	7.0	1.5	1.5	1.4
9	7.0	0.3	0.3	0.29
11	3.5	0.2	0.2	0.19
13	3.5	0.4	0.4	0.38
15	3.5	0.1	0.1	0.1
17	2.5	0.2	0.2	0.19
19	2.5	0.2	0.2	0.19
21	2.5	0.2	0.2	0.19
23	1.0	0.2	0.2	0.19
25	1.0	0.2	0.2	0.19
~				
TDD(%)	8.0	8.7*	8.71*	2.68
TDD <sub>even</sub> (%)	2.0	5.0*	5.0*	2.06*

주) \*는 기준치를 초과하는 값을 나타낸다.

표 6-2. 고조파 전류 평가(B 상)  
Table 6-2. Harmonic current assessment(phase B)

차 수	IEEE 519 limits	Measured values	Simulated values	With the Filters
3	7.0	6.7	6.7	0.11
5	7.0	4.8	4.8	0.08
7	7.0	1.7	1.7	1.74
9	7.0	0.3	0.3	0.31
11	3.5	0.4	0.4	0.42
13	3.5	0.4	0.4	0.42
15	3.5	0.2	0.2	0.21
17	2.5	0.0	0.0	0.0
19	2.5	0.0	0.0	0.0
21	2.5	0.1	0.1	0.1
23	1.0	0.0	0.0	0.0
25	1.0	0.0	0.0	0.0
~				
TDD(%)	8.0	10.1*	10.05*	2.11
TDD <sub>even</sub> (%)	2.0	5.5*	5.5*	0.94

주) \*는 기준치를 초과하는 값을 나타낸다.

표 6-3. 고조파 전류 평가(C 상)  
Table 6-3. Harmonic current assessment(phase C)

차 수	IEEE 519 limits	Measured values	Simulated values	With the Filters
3	7.0	4.4	4.4	0.06
5	7.0	2.9	2.9	0.03
7	7.0	1.3	1.3	1.3
9	7.0	0.5	0.5	0.51
11	3.5	0.0	0.0	0.0
13	3.5	0.3	0.3	0.31
15	3.5	0.0	0.0	0.0
17	2.5	0.1	0.1	0.1
19	2.5	0.1	0.1	0.1
21	2.5	0.0	0.0	0.0
23	1.0	0.1	0.1	0.1
25	1.0	0.0	0.0	0.0
~				
TDD(%)	8.0	7.0	6.99	2.02
TDD <sub>even</sub> (%)	2.0	4.3*	4.3*	1.4

주) \*는 기준치를 초과하는 값을 나타낸다.

표 7. 짝수차 고조파 전류 왜형률  
Table 7. Even harmonics current THD

차 수	A 상		B 상		C 상	
	Measured values	With the filters	Measured values	With the filters	Measured values	With the filters
2	3.4	0.04	5.1	0.09	3.2	0.04
4	3.0	0.03	1.7	0.03	2.6	0.03
6	1.7	1.54	0.4	0.4	1.0	0.98
8	0.6	0.57	0.6	0.62	0.7	0.71
10	0.6	0.57	0.0	0.0	0.5	0.51
12	0.0	0.57	0.4	0.42	0.2	0.21
14	0.5	0.0	0.3	0.31	0.1	0.1
16	0.4	0.48	0.0	0.0	0.3	0.31
18	0.3	0.39	0.1	0.1	0.2	0.21
20	0.3	0.29	0.2	0.21	0.2	0.21
~						
TDD <sub>even</sub> (%)	5.0	2.06	5.5	0.94	4.3	1.40

동조 필터를 적용하면, IEEE Std. 519에 의한 평가 기준치(8.0%)보다 훨씬 작은(약 2.27%) 값으로 감소되어 동조 필터 적용 효과를 검증할 수 있었다.

### 5. 결 론

전기로 부하는 특성상 부하가 시간에 따라 급격하게 변하고, 홀수차 고조파뿐만 아니라 짝수차 고조파도 많이 포함하고 있다.

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

순시치 측정에 의한 수용가 모선에서 고조파 전압 왜형률은 약 1.37[%]이었고, 고조파 전류 왜형률은 약 8.6[%]이었다. 고조파 전압 왜형률은 IEC 61000-3-6 전압 계획 레벨인 6.5[%]이하였다. 고조파 전류 왜형률은 IEEE Std. 519 전류 제한치(8.0%)보다 약간 높게 관측 되었다. 특히 짝수차

고조파는 기준치(2.0%)보다 많이(약 4.9%) 초과되어 고조파 필터를 보강할 필요가 있다.

고조파 해석 프로그램을 사용하여 동조 필터를 설치하고, 고조파 저감 효과를 확인 하였고, 고조파 관리 기준에 따라 평가해 보았다. 고조파 함유량이 높은 제2, 3, 4, 5차 동조 필터를 설치하고 시뮬레이션한 수용가 모선의 전압 왜형률은 설치 전 약 1.37[%]에서 설치 후는 약 0.39[%]로 감소되었다. 전류 왜형률은 설치 전 약 8.6[%]에서 설치 후는 약 2.27[%]으로 많이 감소되어 IEEE Std. 519 전류 제한치(8.0%)를 만족하여 규제가 필요 없는 결과를 도출할 수 있었다.

이 논문은 2006학년도 홍익대학교 교내 연구비에 의하여 지원되었음.

### References

- [1] L. Nikoloski and G. Rafajlovski, "Power Quality Aspects of Arc Steel Melting Furnace", IEEE 10th Mediterranean Electrotechnical Conference, 2000.
- [2] BM 3030, "Basic Measuring Instrument", Dranetz Co., 2000.
- [3] IEC 61000-3-6, "Assessment of Emissions Limits for Distorting Loads in MV or HV Power Systems", 1996.
- [4] IEEE Std. 519-1992, "IEEE Recommended Practice and Requirements for Harmonics Control in Electrical Power Systems".
- [5] EDSA User's Guide, "Electrical Power System Harmonic Analysis Program", EDSA Micro Co. 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 한국전기연구소 선임연구원. 1991년~현재 홍익대학교 전기공학과 교수.

#### 진성은 (陳聖恩)

1980년 1월 8일생. 2005년 홍익대학교 전기공학과 졸업. 2005년~현재 홍익대학교 대학원 전기공학과 석사과정.

#### 이주홍 (李柱洪)

1978년 10월 23일생. 2005년 홍익대학교 전기공학과 졸업. 2005년~현재 홍익대학교 대학원 전기공학과 석사과정.