

전해조 부하의 고조파 측정, 평가 및 동조필터 적용에 관한 연구

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

김경철* · 진성은 · 이주홍 · 서범관 · 전영수

(Kyung-Chul Kim · Seong-Eun Jin · Joo-Hong Lee · Beom-Gwan Seo · Young-Soo Jeon)

요 약

중화학 공업은 전해조를 포함한 비선형 부하를 가지고 있다. AC-DC 컨버터로 구성된 전해조는 고조파 전류를 발생시키고, 전력 계통의 전압을 왜곡 시킨다. 본 논문에서는 전해조 부하의 고조파 현장 측정, 고조파 저감을 위해 수용가 모선에 동조 필터 적용과 국제 고조파 관리 기준인 IEC 61000-3-6과 IEEE 519에 의한 고조파 평가를 심도 있게 분석한다. 고조파 해석 프로그램인 EDSA는 사례연구에 시뮬레이션 도구로 사용되었다.

Abstract

Heavy chemical industries have nonlinear loads including electrolyzers. The electrolysis consists of AC-DC converters which generate harmonic currents and create distortions on the sinusoidal voltage of the power system. This paper provides in depth an analysis on harmonics field measurement for the electrolyzer loads, adding a single-tuned filter at the customer bus for reducing harmonic distortion and harmonic 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 : Electrolyzer loads, Harmonics measurement, Harmonics assessment, Single-tuned filter, IEC 61000-3-6, IEEE Std. 519

1. 서 론

전해조를 주 전기설비로 하는 화학공장은 AC-DC 컨버터를 쓰기 때문에 근본적으로 고조파 전류 발생 원이라 할 수 있다. 컨버터는 펄스 수에 따라 홀수

차 고조파를 많이 발생시키고, 푸리에 이론에 따라 짝수 차 고조파는 거의 없다[1].

고조파원에 대한 정확하고 신뢰성 있는 측정과 평가는 전력 시스템의 고장과 오동작 등을 예방할 수 있게 할 뿐만 아니라, 공통 결합점(PCC, the Point of Common Coupling)에서 수용가와 전력 회사의 역할과 책임을 분담하게 한다.

본 논문에서는 고조파를 측정하고, 국제 고조파 관리 기준에 따라 평가하고자 한다. 평가 결과에 따

* 주저자 : 홍익대학교 전기공학과 교수
Tel : 041-860-2568, Fax : 041-863-7605
E-mail : yangjier@hongik.ac.kr
접수일자 : 2005년 11월 14일
1차심사 : 2005년 11월 16일
심사완료 : 2005년 12월 2일

라 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 22.9[kV], 단락용량이 299[MVA], 단락 임피던스는 100[MVA] 기준으로 $0.18+j33.49[\%]$ 이다.

배전선로는 선로 임피던스가 $0.0499+j0.1088[\Omega]$ 이고, 선로 어드미턴스는 $j0.1248 \times 10^{-3}[\text{S}]$ 이다.

수용가는 정류용 변압기(5.1[MVA], 4.4[MVA], 7.6[MVA]) 3대와 동력 부하용 변압기(2.3[MVA]) 1대가 있다.

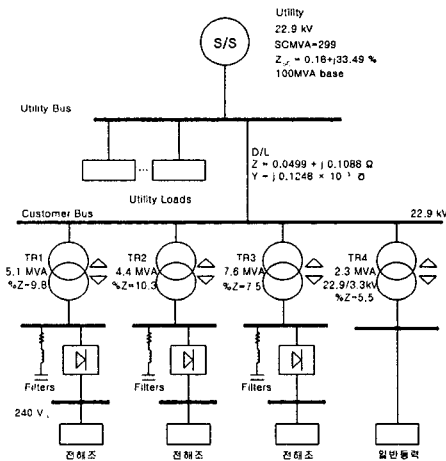


그림 1. 사례연구 시스템의 단선도
Fig. 1. One-line diagram of the system under study case

2.2 고조파 측정 장비

고조파 측정과 평가는 전력회사와 수용가가 만나는 점, 즉 공통결합점에서 이루어지는데, 사례연구 수용가의 모선이 된다.

고조파 측정 장비는 BMI-PX5[2]가 사용되었다(그림 2).

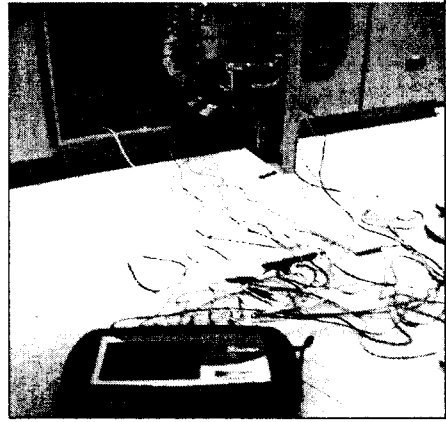


그림 2. 측정 장비
Fig. 2. Measuring equipment

BMI-PX5 장비로 측정된 데이터를 요약하면 표 1과 같다. 그림 3은 측정된 전압의 파형과 히스토그램이다.

그림 4는 측정된 전류의 파형과 히스토그램이다.

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

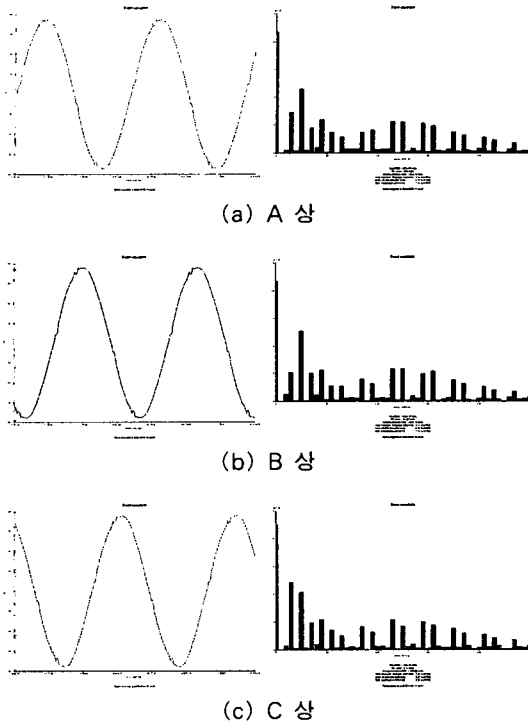
	A 상	B 상	C 상
전압 [V]	22783	22920	22826
전류 [A]	461.75	467.11	465.0
전압왜형률 [%]	2.172	2.172	2.256
전류왜형률 [%]	9.356	9.875	9.488

3. 고조파 평가

고조파 평가의 원칙은 전력회사와 수용가가 역할과 책임을 분담하는데 있다. 고조파 평가는 PCC에서의 전압과 전류를 고조파 관리 기준과 비교해야 한다. 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 전력 회사가 채택하는 값이고, 부하 유출 제한치를 결정하는데 사용한다.

전해조 부아의 고조파 측정, 평가 및 동조필터 적용에 관한 연구

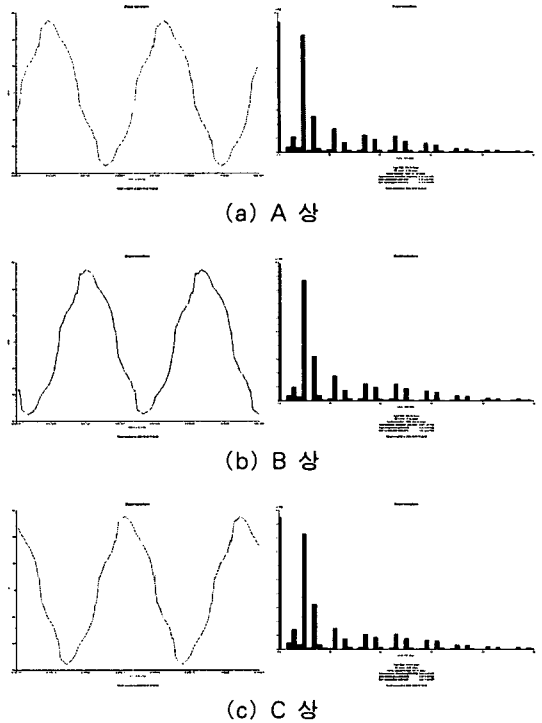


(a) A 상

(b) B 상

(c) C 상

그림 3. 측정된 전압의 파형 및 히스토그램
Fig. 3. Measured voltage waveforms and histograms



(a) A 상

(b) B 상

(c) C 상

그림 4. 측정된 전류의 파형 및 히스토그램
Fig. 4. Measured current waveforms and histograms

PCC에서의 전압 왜형률(THD, Total Darmonic Distortion)은 순시치 측정 결과 2.172[%], 2.172[%], 2.256[%]로 IEC 61000-3-6 기준치(6.5[%]) 보다 낮아 고조파 규제 대상은 아니나, 단독 배전선로로 수전 받는 것을 고려하면 조금 높은 편이다. 참고로 한전은 3.0[%]를 기준으로 하고 있다.

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

차수	IEC 61000-3-6 Planning level	A 상	B 상	C 상
2	1.6	0.059	0.128	0.078
3	4.0	0.731	0.525	1.216
4	1.0	0.038	0.019	0.028
5	5.0	1.147	1.275	1.034
6	0.5	0.059	0.013	0.038
7	4.0	0.456	0.516	0.494

차수	IEC 61000-3-6 Planning level	A 상	B 상	C 상
8	0.4	0.103	0.113	0.1
9	1.2	0.603	0.569	0.553
10	0.4	0.025	0.034	0.016
11	3.0	0.381	0.281	0.356
12	0.2	0	0.028	0.041
13	2.5	0.288	0.272	0.266
14	0.2	0.072	0.063	0.041
15	0.3	0.081	0.072	0.063
16	0.2	0.075	0.056	0.041
17	1.6	0.381	0.4	0.422
~				
50	0.2	0.053	0.078	0.091
THDv ([%])	6.5	2.172	2.172	2.256

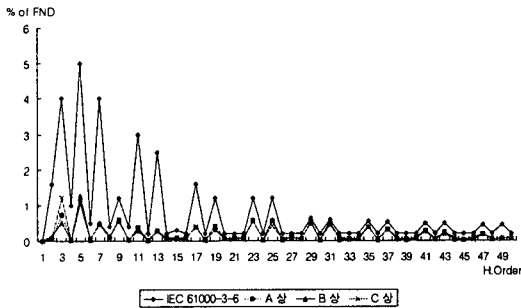


그림 5. 고조파 전압 평가
Fig. 5. Harmonic voltage assessment

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

단락전류,

$$I_{sc} = \frac{299 MVA}{\sqrt{3} \times 22.9 kV} = 7538.5 A$$

1년 평균 전력 : 17,620[kW]

1년 평균 역률 : 98[%]

부하전류,

$$I_L = \frac{17620 kW / 0.98}{\sqrt{3} \times 22.9 kV} = 453.3 A$$

단락비,

$$SCR = \frac{I_{sc}}{I_L} = 16.6$$

여기서 I_L 은 수용가의 연간 평균 최대 전류여야 하지만, 연간 평균 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 기본과 부하전류를 이용하기 때문에 약간의 차이는 있으나 사례연구 수용가

의 경우는 부하가 연중 비슷하여 큰 차이는 없다.

표 3은 고조파 전류 평가를 간추려 놓은 것이고, 그림 6은 표 3을 그림으로 나타낸 것이다.

표 3. 고조파 전류 평가
Table 3. Harmonic current assessment

차수	IEEE 519 limits	A 상	B 상	C 상
3	4.0	1.094	0.978	1.416
5	4.0	8.406*	8.706*	8.284*
7	4.0	2.563	3.213	3.266
9	4.0	0.109	0.059	0.106
11	2.0	1.681	1.803	1.531
13	2.0	0.706	0.747	0.778
15	2.0	0.044	0.022	0.022
17	1.5	1.206	1.231	1.078
19	1.5	0.903	0.963	0.897
21	1.5	0.016	0.044	0.003
23	0.6	1.166*	1.213*	0.097*
25	0.6	0.759*	0.891*	0.8*
~				
49	0.3	0.088	0.097	0.106
TDD ([%])	5.0	9.356*	9.875*	9.488*

주) *은 기준치를 초과하는 값을 나타낸다.

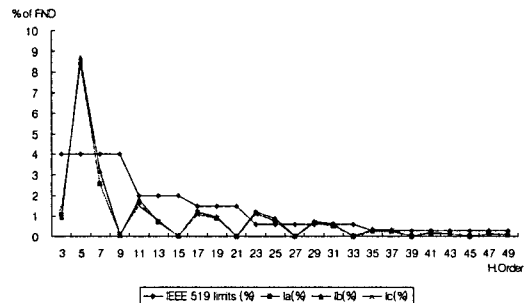


그림 6. 고조파 전류 평가
Fig. 6. Harmonic current assessment

고조파 전류 평가 결과는 전류 왜형률이 IEEE 기준치(5[%])를 초과(9.356[%], 9.875[%], 9.488[%])하고 있다. 특히 제 5차 고조파가 기준치(4[%])보다 많이 초과(8.406[%], 8.706[%], 8.284[%]) 한다. 또한 제

전애플 부하의 고조파 측정, 평가 및 동조필터 적용에 관한 연구

23차와 제 25차 고조파도 기준치(0.6[%])를 초과 하므로 이에 대한 고조파 필터가 요구된다.

4. 동조 필터 적용

고조파 저감 기법으로 동조 필터가 많이 쓰이고 있다. 그림 7은 동조 필터의 구성을 보여주고 있다.

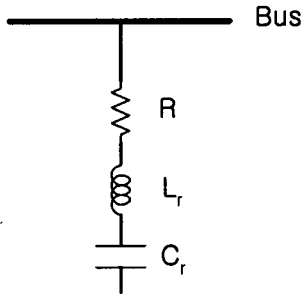


그림 7. 동조 필터
Fig. 7. A single-tuned filter

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

$$h = \frac{1}{w_0 \sqrt{L_r C_r}} \quad (1)$$

여기서 w_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 결과를 보면, 제5차 고조파와 제 23차 고조파가 고조파 관리 기준치를 많이 초과 하므로 제5차 동조 필터와 제23차 동조 필터를 설계하여 설치 전, 후의 고조파 평가를 하기로 한다.

제5차 동조 필터의 제원은, 먼저 저항 $R = 0.001 [\Omega]$, 인덕턴스 $X_L = 0.5 [\Omega]$ 으로 정하고 커패시턴스(X_C)를 구하면 된다.

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

마찬가지로 제23차 동조 필터의 제원을 구한다.

$$R = 0.001 [\Omega]$$

$$X_L = 0.5 [\Omega]$$

$$X_C = h^2 X_L = 23^2 \times 0.5 = 264.5 [\Omega]$$

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

그림 8은 제5차 동조 필터의 임피던스 응답 곡선이다.

그림 9는 EDSA로 시뮬레이션 한 동조 필터 설치 전의 전류 파형과 히스토그램이고, 그림 10은 EDSA로 시뮬레이션 한 제5차 동조 필터와 제23차 동조 필터 설치 후의 전류 파형과 히스토그램이다.

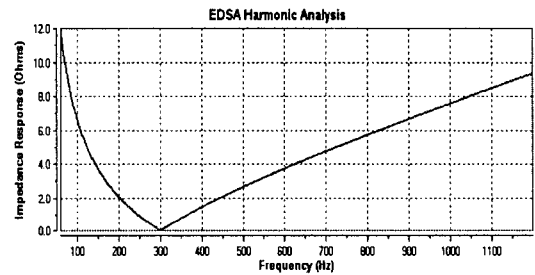


그림 8. 제 5차 동조 필터의 임피던스 응답
Fig. 8. Impedance response of the 5th resonant filter

표 4는 동조 필터 설치 전, 후의 전류와 전류 왜형을 비교이다.

표 4. 전류 및 전류 왜형률
Table 4. Current magnitude and total harmonics distortion

		Measured values	Simulated values	With the filters
A 상	IA [A]	461.75	461.40	454.54
	ITHD,A[%]	9.356	9.35	3.69
B 상	IB [A]	467.11	469.79	463.80
	ITHD,B[%]	9.875	9.87	4.40
C 상	IC [A]	465.0	465.59	459.80
	ITHD,C[%]	9.488	9.48	4.38

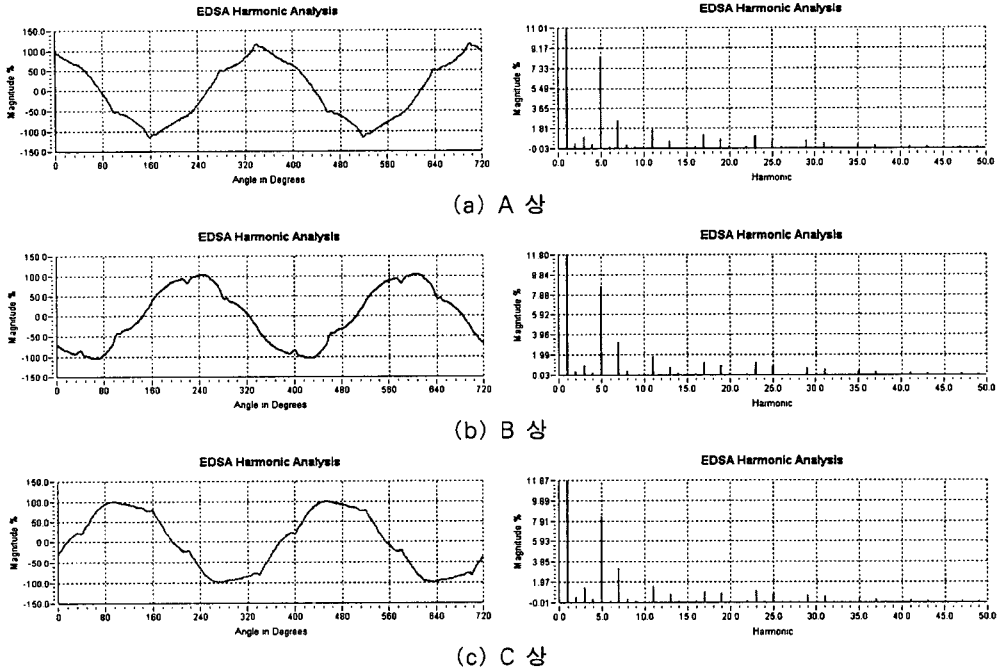


그림 9. 동조 필터 설치 전의 전류 파형 및 히스토그램
 Fig. 9. Current waveforms and histograms without the resonant filters

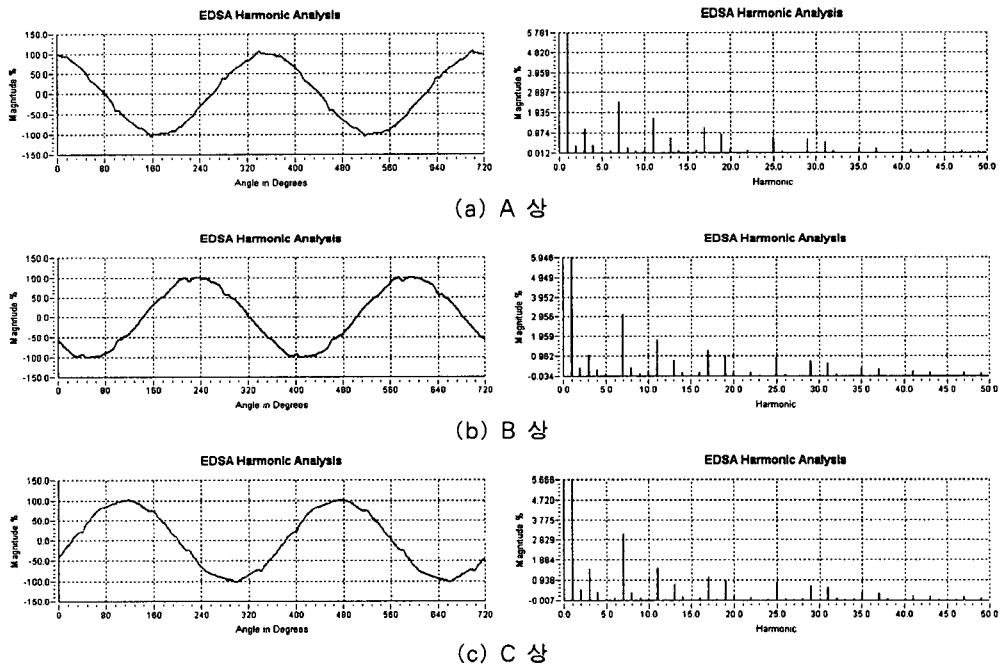


그림 10. 동조 필터 설치 후의 전류 파형 및 히스토그램
 Fig. 10. Current waveforms and histograms with the resonant filters

전애포 부하의 고조파 측정, 평가 및 동조필터 적용에 관한 연구

표 4에서 알 수 있듯이, EDSA 시뮬레이션이 실험치와 유사한 값으로 모의되었다. 또한 동조 필터를 적용하면 전류 왜형률이 약 9.57[%]에서 약 4.16[%]로 감소되었고, 부하전류도 약간 감소하였다.

표 5는 동조 필터 설치 전, 후의 전압과 전압 왜형을 비교이다.

표 5. 전압 및 전압 왜형률

Table 5. Voltage magnitude and total harmonics distortion

		Measured values	Simulated values	With the filters
A 상	VA [V]	22783	22789	22875
	VTHD,A[%]	2.172	2.17	1.08
B 상	VB [V]	22920	22926	22922
	VTHD,B[%]	2.172	2.18	1.14
C 상	VC [V]	22826	22833	22828
	VTHD,C[%]	2.256	2.26	1.22

동조 필터를 적용하면 수용가 모선의 전압 왜형률이 약 2.2[%]에서 약 1.15[%]로 많이 감소되었다.

동조 필터를 적용하였을 때의 고조파 전류를 IEEE Std. 519에 의해 평가하기로 한다. 표 6은 고조파 전류 평가 결과를 간추려 놓은 것이고, 그림 11은 표 6을 그림으로 나타낸 것이다.

표 6-1. 고조파 전류 평가(A 상)

Table 6-1. Harmonic current assessment(phase A)

차수	IEEE 519 limits	Measured values	Simulated values	With the filters
3	4.0	1.094	1.09	1.15
5	4.0	8.406*	8.41*	0.05
7	4.0	2.563	2.56	2.28
9	4.0	0.109	0.11	0.1
11	2.0	1.681	1.68	1.59
13	2.0	0.706	0.7	0.67
15	2.0	0.044	0.04	0.04
17	1.5	1.206	1.20	1.22
19	1.5	0.903	0.90	0.99
21	1.5	0.016	0.02	0.02
23	0.6	1.166*	1.16*	0.0

차수	IEEE 519 limits	Measured values	Simulated values	With the filters
25	0.6	0.759*	0.76*	0.5
~				
TDD ([%])	5.0	9.356*	9.35*	3.69

주] *는 기준치를 초과하는 값을 나타낸다.

표 6-2. 고조파 전류 평가(B 상)

Table 6-2. Harmonic current assessment(phase B)

차수	IEEE 519 limits	Measured values	Simulated values	With the filters
3	4.0	0.978	0.98	1.02
5	4.0	8.706*	8.71*	0.07
7	4.0	3.213	3.21	3.09
9	4.0	0.059	0.06	0.06
11	2.0	1.803	1.80	1.80
13	2.0	0.747	0.75	0.75
15	2.0	0.022	0.02	0.02
17	1.5	1.231	1.23	1.24
19	1.5	0.963	0.96	0.98
21	1.5	0.044	0.04	0.04
23	0.6	1.213*	1.21*	0.01
25	0.6	0.891*	0.89*	0.87*
~				
TDD ([%])	5.0	9.875*	9.87*	4.40

주] *는 기준치를 초과하는 값을 나타낸다.

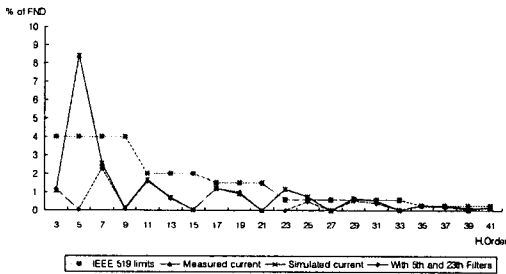
표 6-3. 고조파 전류 평가(C 상)

Table 6-3. Harmonic current assessment(phase C)

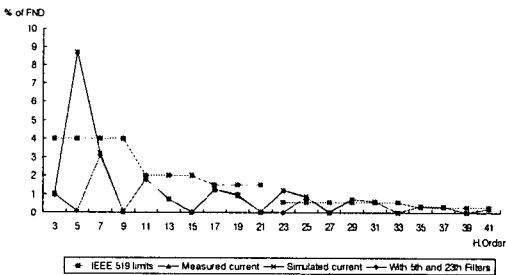
차수	IEEE 519 limits	Measured values	Simulated values	With the filters
3	4.0	1.416	1.42	1.47
5	4.0	8.284*	8.28*	0.06
7	4.0	3.266	3.27	3.11
9	4.0	0.106	0.11	0.10
11	2.0	1.531	1.53	1.52
13	2.0	0.778	0.78	0.78
15	2.0	0.022	0.02	0.02
17	1.5	1.078	1.08	1.09

차수	IEEE 519 limits	Measured values	Simulated values	With the filters
19	1.5	0.897	0.90	0.91
21	1.5	0.003	0.003	0.003
23	0.6	0.097*	0.10*	0.01
25	0.6	0.8*	0.8*	0.78*
~				
TDD (%)	5.0	9.488*	9.48*	4.38

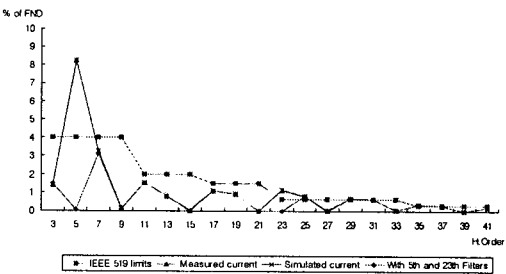
주] *는 기준치를 초과하는 값을 나타낸다.



(a) A 상



(b) B 상



(c) C 상

그림 11. 고조파 전류 평가
Fig. 11. Harmonic current evaluation

동조 필터를 적용하면 IEEE Std. 519에 의한 평가는 기준치(5.0[%])보다 작은(약 4.16[%])값으로 되어 만족할 만한 결과를 얻을 수 있었다.

5. 결 론

전해조 부하가 주 전기 설비인 화학 공장은 비선형 부하가 많아 고조파 발생이 많은 것으로 알려져 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 공통결합점에서 고조파 전압 왜형률은 약 2.2[%]이었고, 고조파 전류 왜형률은 약 9.57[%]이었다. 고조파 전압 왜형률은 IEC 61000-3-6 전압 계획 레벨인 6.5[%] 이하이나 단독 배전선로인 점을 감안하면 조금 높은 편이다(참고로 한전은 3.0[%]를 기준으로 한다). 고조파 전류 왜형률은 IEEE Std. 519 전류 제한치(5.0[%])보다 훨씬 높은 결과가 관측되었다. 이는 기존의 고조파 필터가 적절치 못함을 나타내는 것이고, 특히 제5, 23, 25차 고조파 필터를 보강할 필요가 있다.

고조파 해석 프로그램을 사용하여 동조 필터를 설치하고, 고조파 저감 효과를 알아보고 고조파 관리 기준에 따라 평가해 보았다. 제5, 23차 동조 필터를 설치하고 시뮬레이션한 수용가 모선의 전압 왜형률은 설치 전 약 2.2[%]에서 설치 후는 약 1.15[%]로 감소되었다. 전류 왜형률은 설치 전 약 9.57[%]에서 설치 후는 약 4.16[%]로 IEEE Std. 519 전류 제한치(5.0[%])를 만족하여 규제가 필요 없는 결과를 도출할 수 있었다.

본 연구는 전력산업 연구개발사업으로 수행되었음.

References

- [1] P. Stade, M. Malsch, and H. Schau, "A New Filter Concept for an Electrolysis in a Chemical Plant", CRED2001, Conference Publication No. 482, IEEE 2001.
- [2] BMI-PX5, "Basic Measuring Instrument PowerXplorer", Dranetz Co., 2004.
- [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.

서범관 (徐梵寬)

1977년 2월 18일생. 2002년 홍익대학교 전기공학과 졸업. 2004년 홍익대학교 대학원 전기공학과 졸업(석사). 2004년~현재 동 대학원 박사과정.

전영수 (全榮洙)

1960년 2월 9일생. 1983년 성균관대학교 전기공학과 졸업. 1987년 한국전력공사 입사. 1997년 충남대학교 산업대학원 전기공학과 졸업(석사). 1990년~현재 한전 전력연구원 전력계통연구소 선임연구원.