

전기로 부하에서 SVC의 고조파 및 플리커 효과에 관한 연구

(A Study on the Harmonic and Flicker Effects of SVC in Electric Arc Furnace Loads)

김경철* · 최형범 · 오정석

(Kyung-Chul Kim · Hyoung-Bumb Choi · Jung-Suk Oh)

요 약

규모가 큰 제철소는 전기로를 포함한 시간에 따라 변하는 비선형 부하를 가지고 있다. 이들 비선형 부하는 고조파 전류를 발생시키고, 전력계통의 전압을 왜곡시킨다. 플리커는 전압 변동의 크기에 따라 램프의 방출 변화에 의한 인간의 지각 효과로 정의된다. SVC의 주 목적은 공통결합점에서 전압을 한계값 이하로 유지하는데 있다. 본 논문에서는 SVC 투입 전후의 고조파와 플리커 저감 효과를 분석하고, IEC 61000-3-6과 IEC 61000-3-7에 의해 평가하였다.

Abstract

Large steel industries have time-varying nonlinear loads including electric arc furnaces. These nonlinear loads generate harmonic currents and create distortions on the sinusoidal voltage of the power system. Flicker can be defined as the effect produced on the human visual perception by a changing emission of light lamps subjected to magnitude fluctuations of their supply voltage. The main objective of the static var compensator(SVC) is to maintain the rms voltage at the point of common coupling within the limit. In this paper, harmonic and flicker mitigation studies with and without the SVC are investigated, and are evaluated by the IEC 61000-3-6 and IEC 61000-3-7.

Key Words : Electric arc furnace, Time-varying nonlinear loads, Static var compensator, Harmonics, Flickers, IEC 61000-3-6, IEC 61000-3-7

1. 서 론

제철소는 전기로를 포함한 비선형 부하가 주 전기 설비이고, 단 시간 내에 전류 변화가 급격히 일어나

며 큰 전압 변동을 일으키므로 근본적으로 고조파와 플리커 발생원이라 할 수 있다[1-2].

고조파원에 대한 정확하고 신뢰성 있는 측정과 평가는 전력 시스템의 고장과 오동작 등을 예방할 수 있게 한다. 플리커는 장비의 효율을 저하시키고, 보호계전기시스템의 장해, 토크 및 전력의 동요 등 여러 장해를 일으킨다.

그러므로 고조파 및 플리커는 전력회사나 수용가

* 주저자 : 홍익대학교 전기공학과 교수
Tel : 041-860-2568, Fax : 041-863-7605
E-mail : yangjier@hongik.ac.kr
접수일자 : 2007년 9월 5일
1차심사 : 2007년 9월 10일
심사완료 : 2007년 9월 21일

에게 중요한 전력품질의 평가요소 이므로, 전력회사와 수용가의 역할과 책임을 분담하게 된다. 수용가는 공동결합점(PCC, the Point of Common Coupling)에서 전력회사가 제한하는 한계값 이하로의 방출을 유지해야 하는 책임이 있다. 전력회사는 공동결합점에서 고조파 전압이 일정 수준 이하가 되도록 유지시켜야 한다.

본 논문에서는 시간에 따라 변하는 전기로 부하의 고조파 및 플리커를 국제기준에 의거하여 측정하고, 평가하고자 한다. 급격한 전압변동을 저감하는데 널리 쓰이고 있는 SVC(Static Var Compensator) 투입 전후의 고조파 및 플리커를 실측하여 고조파 및 플리커 개선효과를 분석한다.

2. 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 $0.5184+j3.4641$ [Ω]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.

3. 고조파 및 플리커 측정 장비

고조파 및 플리커 측정과 평가는 전력회사와 수용가가 만나는 점, 즉 공동결합점에서 이루어지는데, 사례 연구 수용가의 모선이 된다.

시간에 따라 변하는 고조파는 IEC 61000-4-7[3]에 따라 측정시간을 3초(very short time)로 하고, 전기 설비의 순간 영향이나 오동작을 일으키는 원인을 파악하는데 유용하며, 전기 설비의 장기간 영향이나 소손 및 수명 감소의 원인을 추정하는데 쓰도록 권고하고 있다.

고조파 측정에 사용된 장비는 PNA-2010[4]으로

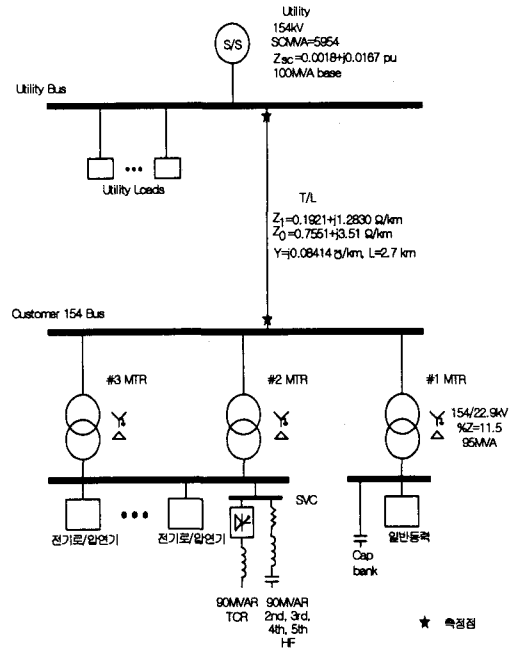


그림 1. 사례 연구 시스템의 단선도
Fig. 1. One-line diagram of the case study system

12사이클 측정에 36사이클 간격, 즉 0.8초에 한번씩 측정한다.

시간에 따라 변하는 플리커는 IEC 61000-4-15[5]에 따라 10분 간격으로 24시간 동안 측정한다.

측정 장비는 PNA-2010으로 IEC 61000-4-15에서 요구하는 조건을 갖춘 장비로 널리 쓰이고 있다.

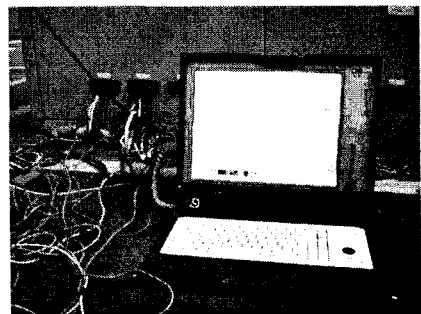


그림 2. 측정 장비
Fig. 2. Measuring equipment

4. 고조파 분석

4.1 SVC 투입 전 고조파 측정

SVC는 1970년대부터 플리커를 저감시키는 수단으로 널리 쓰이고 있다. SVC 설치 목적은 전기로 부하에 신속하고 정확하게 무효 전력을 보상하여 모선

전압을 일정하게 유지하고, 플리커를 저감시키는데 있다. 고조파 필터는 고조파를 저감시키는 역할이외에 진상 무효전력을 공급한다[6-8].

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

그림 3은 PNA-2010 장비로 24시간 동안 측정된 전압의 실효값과 왜형률(THD, Total Harmonic

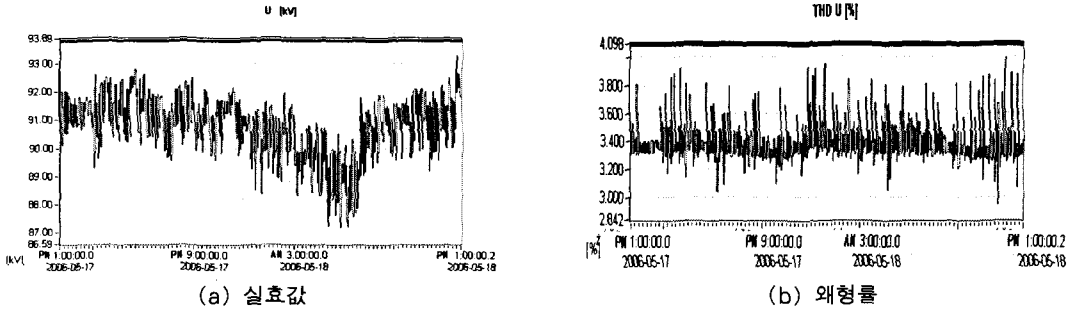


그림 3. 전압 실효값과 왜형률의 시간경향(SVC 투입 전)
Fig. 3. Measured voltage magnitude and THD time trends(without SVC)

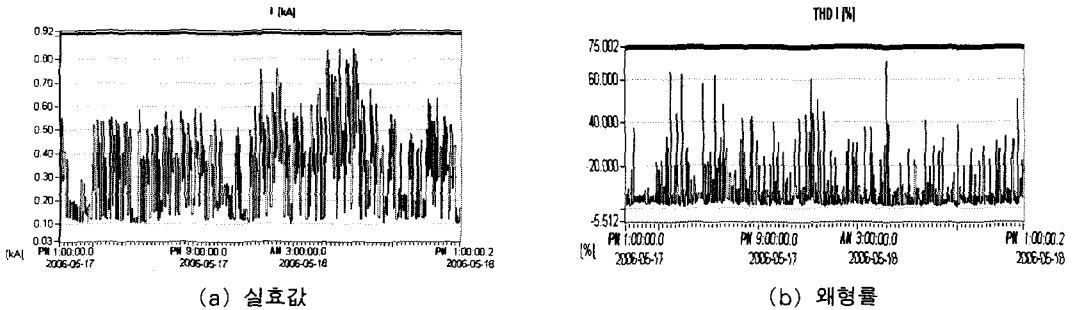


그림 4. 전류 실효값과 왜형률의 시간경향(SVC 투입 전)
Fig. 4. Measured current magnitude and THD time trends(without SVC)

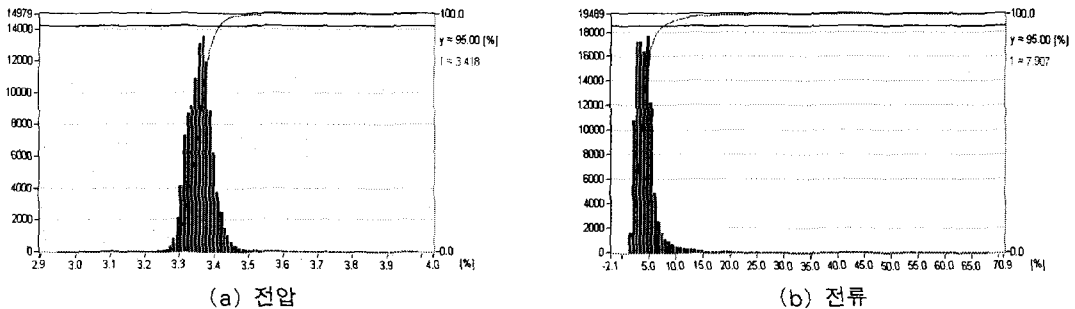


그림 5. 측정된 전압 및 전류 왜형률의 누적분포(SVC 투입 전)
Fig. 5. Measured voltage and current THD cumulative probability distribution(without SVC)

Distortion)로 편의상 A상만 나타낸다.

그림 3과 4에서 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[%] 누적확률값이 측정기간 동안의 대표값으로 간주 된다[9-10].

표 1. SVC 투입 전 측정된 데이터
Table 1. Measured data without SVC

	A 상 (mean)	B 상 (mean)	C 상 (mean)
전압[kV]	159.1	159.6	159.8
전류[kA]	0.30	0.32	0.33
전압왜형률[%]	0.583	0.603	0.645
전류왜형률[%]	4.193	4.284	4.123
유효전력[GW]	0.026	0.029	0.026
피상전력[GVA]	0.027	0.031	0.028

그림 5는 PNA-2010 장비로 24시간 동안 측정한 누적확률 분포도이고, 편의상 A상만 나타낸다.

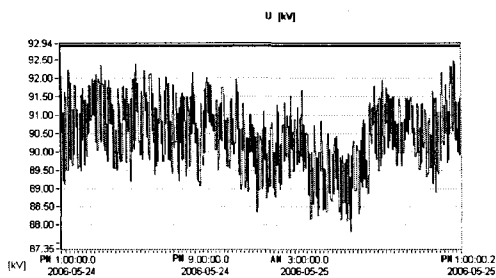
4.2 SVC 투입 후 고조파 측정

24시간 동안 SVC를 투입하고 PNA-2010 장비로 측정된 데이터를 요약하면 표 2와 같다.

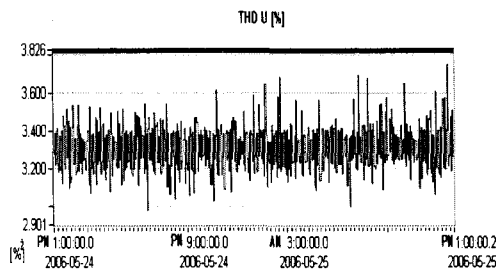
그림 6은 PNA-2010 장비로 24시간 동안 측정된 전압의 실효값과 왜형률로 편의상 A상만 나타낸다.

그림 7은 PNA-2010 장비로 24시간 동안 측정된 전류의 실효값과 왜형률로 편의상 A상만 나타낸다.

그림 8은 PNA-2010 장비로 24시간 동안 측정한 누적확률 분포도이고, 편의상 A상만 나타낸다.



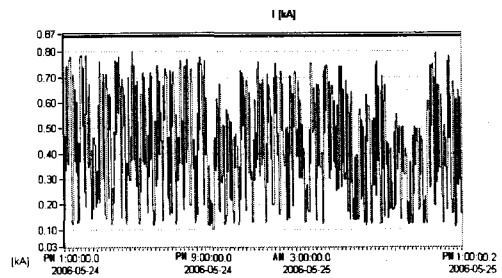
(a) 실효값



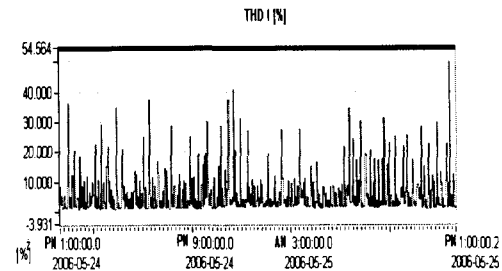
(b) 왜형률

그림 6. 측정된 전압 실효값과 왜형률의 시간경향(SVC 투입 후)

Fig. 6. Measured voltage magnitude and THD time trends(with SVC)



(a) 실효값

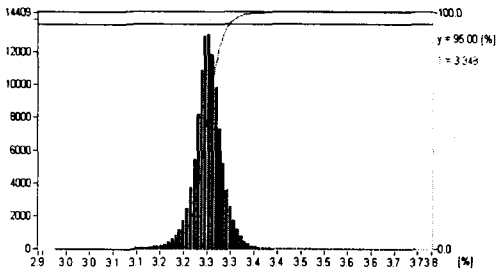


(b) 왜형률

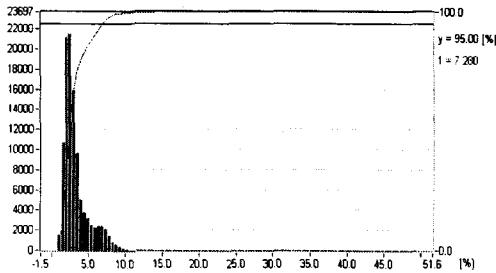
그림 7. 측정된 전류 실효값과 왜형률의 시간경향(SVC 투입 후)

Fig. 7. Measured current magnitude and THD time trends(with SVC)

전기로 부하에서 SVC의 고조파 및 플리커 효과에 관한 연구



(a) 전압



(b) 전류

그림 8. 측정된 전압 및 전류 왜형률의 누적분포(SVC 투입 후)

Fig. 8. Measured voltage and current THD cumulative probability distribution(with SVC)

표 2. SVC 투입 후 측정된 데이터
Table 2. Measured data with SVC

	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
전압왜형률[%]	0.445	0.407	0.464
전류왜형률[%]	3.215	2.996	3.102
유효전력[GW]	0.038	0.042	0.038
피상전력[GVA]	0.039	0.044	0.039

4.3 고조파 평가

고조파 평가의 원칙은 전력회사와 수용가가 역할과 책임을 분담하는데 있다.

고조파 전압 평가는 IEC 61000-3-6[11]을 적용한다. 계획 레벨(Planning levels)은 전력회사가 채택하는 값이고, 부하 유출 제한치를 결정하는데 사용한다.

표 3은 고조파 전압 평가를 간추려 놓은 것이다. 전압 왜형률(THD)은 A, B, C 상을 평균한 값이다.

표 3. IEC에 의한 고조파 전압 평가
Table 3. Harmonic voltage evaluation by IEC

차 수	IEC Planning levels	Without SVC	With SVC
2	1.5	0.459	0.647
3	2.0	0.369	0.380
4	1.0	0.788	0.768
5	2.0	0.796	0.491
6	0.5	0.318	0.318
7	2.0	0.313	0.267
8	0.4	0.211	0.154
9	1.0	0.219	0.224
10	0.4	0.131	0.117
11	1.5	0.363	0.372
12	0.2	0.056	0.095
13	1.5	0.161	0.155
14	0.2	0.098	0.092
15	0.3	0.101	0.101
16	0.2	0.095	0.096
17	1.0	0.113	0.111
18	0.2	0.064	0.058
19	1.0	0.051	0.084
20	0.2	0.070	0.064
21	0.2	0.075	0.074
~			
50	0.2	0.070	0.066
THDv[%]	3.0	1.513	1.435

IEC에 의한 고조파 전압평가 결과는 기준치(3.0[%])보다 작은 SVC 투입전은 1.513[%], SVC 투입 후는 1.435[%]로 나타났다. SVC 설치 효과로 전압 왜형률은 약 5.16[%]이므로, SVC 투입 후는 기준에 적합한 결과이나, SVC 투입 전은 기준치를 초과한다.

IEC에 의한 고조파 전류 평가는 계획레벨의 1단계에서 간략히 유출량을 판별하고 있다. 표 4는 고조파 전류 평가를 간추려 놓은 것이다. 전류 왜형률은 A, B, C 상을 평균한 값이다.

표 4. IEC에 의한 고조파 전류 평가
Table 4. Harmonic current evaluation by IEC

차 수	IEC limits I_{hi}/I_n ([%])	Without SVC	With SVC
5	5 ~ 6	1.820	2.183
7	3 ~ 4	1.618	1.990
11	1.5 ~ 3	1.657	1.375
13	1 ~ 2.5	1.616	0.823
$\sqrt{\sum I_h^2}$	6 ~ 8	11.721	8.159

주) I_n =정격전류[A], I_{hi} = i 차수의 고조파 전류[A]

IEC에 의한 고조파 전류평가 결과는 기준치(6~8[%])보다 SVC 투입 전에는 초과(11.721[%])하고, SVC 투입 후에는 기준치에 근접한 8.159[%]이었다. SVC 설치 효과는 전류 왜형률이 약 30.4[%] 감소로 나타났다.

5. 플리커 분석

플리커는 발광 빛의 자극에 의해 야기되는 시각적인 감각의 불안정한 느낌을 나타낸다.

플리커 측정기의 출력은 단기 플리커 평가 지수인 P_{st} 와 장기 플리커 평가 지수인 P_{lt} 로 표현된다.

단기 플리커 평가는 관찰 주기 'T_{short} = 10분'에 의한 간소한 측정이 P_{st} 에 의해 구해지고, 이는 플리커 측정기의 출력에서 얻게 되는 통계값이다. 참고로 $P_{st}=1.0$ 은 50[%] 사람들이 플리커를 감지하는 값이고, 단위는 pu(perceptibility units)이다.

장기 플리커는 관찰 주기 동안 108개 이상의 단기 플리커 데이터에서 P_{lt} 를 구하여 평가되고, 전기로와 같은 부하의 장기 평가에 적합하다.

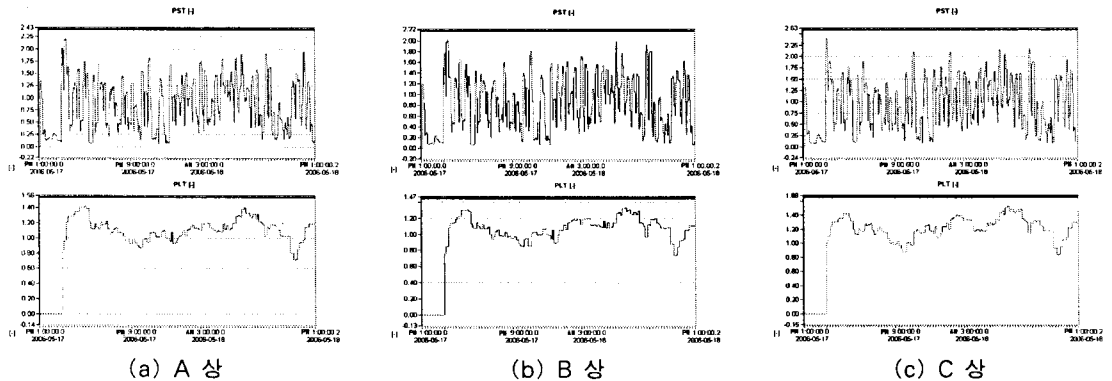


그림 9. 측정된 P_{st} 와 P_{lt} 의 시간경향(SVC 투입 전)
Fig. 9. Measured P_{st} and P_{lt} time trend(without SVC)

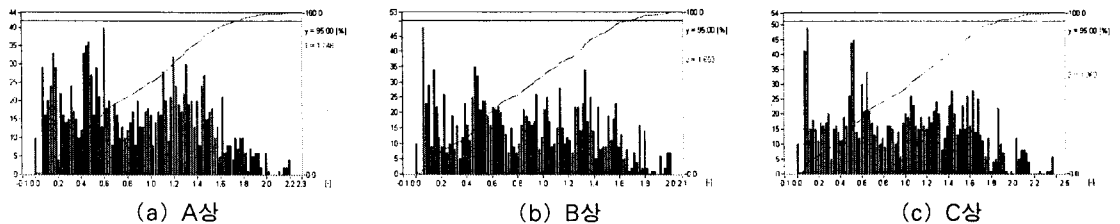


그림 10. 측정된 P_{st} 누적확률 분포도(SVC 투입 전)
Fig. 10. Measured P_{st} cumulative probability distribution(without SVC)

전기로 부하에서 SVC의 고조파 및 플리커 요괴에 관한 연구

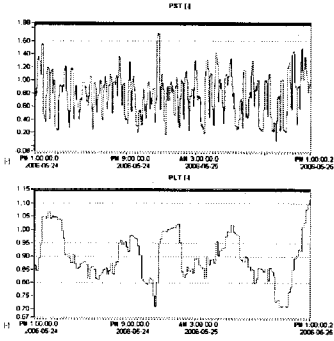
5.1 SVC 투입 전 플리커 측정

24시간 동안 SVC를 분리하고 PNA-2010 장비로 측정된 데이터를 요약하면 표 5와 같다.

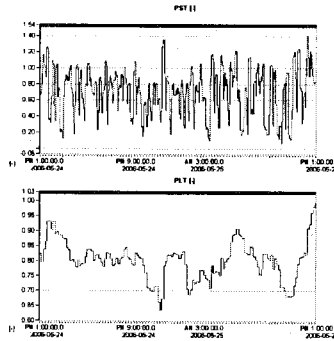
표 5. SVC 투입 전 측정된 데이터
Table 5. Measured data without SVC

	A 상 (mean)	B 상 (mean)	C 상 (mean)
전압[kV]	159.1	159.6	159.8
전류[kA]	0.30	0.32	0.33
유효전력[GW]	0.026	0.029	0.026
피상전력[GVA]	0.027	0.031	0.028

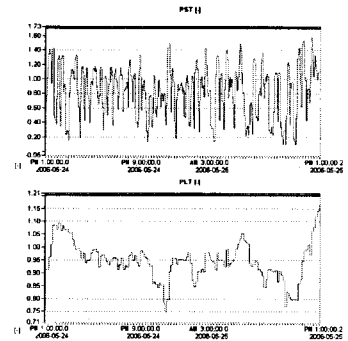
그림 9은 PNA-2010 장비로 24시간 동안 측정된 P_{st} 와 P_{lt} 의 시간 경향을 나타낸다.



(a) A 상



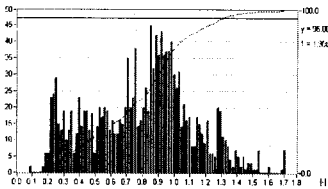
(b) B 상



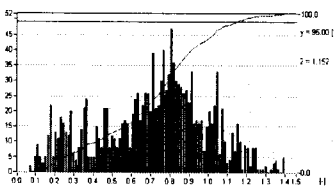
(c) C 상

그림 11. 측정된 P_{st} 와 P_{lt} 의 시간경향(SVC 투입 후)

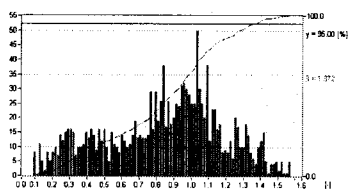
Fig. 11. Measured P_{st} and P_{lt} time trend(with SVC)



(a) A 상



(b) B 상



(c) C 상

그림 12. 측정된 누적확률 분포도(SVC 투입 후)

Fig. 12. Measured P_{st} cumulative probability distribution(with SVC)

그림 10은 SVC 투입 전에 PNA-2010 장비로 24시간 동안 측정된 P_{st} 의 누적확률 분포도이다.

5.2 SVC 투입 후 플리커 측정

24시간 동안 SVC를 투입하고 PNA-2010 장비로 측정된 데이터를 요약하면 표 6과 같다.

표 6. SVC 투입 후 측정된 데이터
Table 6. Measured data with SVC

	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

그림 11은 PNA-2010 장비로 24시간 동안 측정된 P_{st} 와 P_{it} 의 시간경향을 나타낸다.

그림 12은 PNA-2010 장비로 24시간 동안 측정된 P_{st} 의 누적확률 분포도이다.

5.3 플리커 평가

그림 9와 11에서 알 수 있듯이 플리커는 시간에 따라 변하는 특성을 가지고 있다. 이와 같이 시간에 따라 변하는 플리커를 평가하기 위해서는 누적확률(CP, Cumulative Probability)을 사용한다. 50[%] 누적확률은 평균값을 구하는데, 95[%] 누적확률은 중앙(1[kV] < [MV] ≤ 35[kV])에서의 적합성레벨(compatibility levels)에서 쓰이고, 99[%] 누적확률은 고압(35[kV] < [HV] ≤ 230[kV])에 대한 P_{st} 및 P_{it} 한계값을 규정하는데 사용된다[12].

전력시스템에 사용되는 시변 부하의 플리커 평가는 IEC 61000-3-7에서 기술하고 있다.

평가 시 측정은 최소 1주일 동안 수행되어야 하고 계획레벨은 99[%] 누적확률 값을 사용한다.

플리커 측정은 SVC 투입 전후 24시간동안만 하였고, SVC 투입 전후의 부하 상태도 동일하지 않아 정확한 비교는 어려웠다. 표 7는 플리커 평가를 간추려 놓았다.

표 7. IEC에 의한 플리커 평가
Table 7. Flicker evaluation by IEC

Flicker index	IEC 61000-3-7 Planning levels	Without SVC (average)	With SVC (average)
$P_{st(99\%)}$	0.8	2.024*	1.442*
$P_{it(99\%)}$	0.6	1.407*	1.048*

주] *는 기준치를 초과하는 값이다.

국제기준 IEC 61000-3-7에 의거한 플리커 평가 결과는 SVC 투입 전후 모두 기준값을 초과하였다.

SVC를 투입하면 투입전보다 약 40.4[%] 플리커 개선효과를 보였다. 국제기준에 맞추려면 기존의 SVC를 Upgrade 할 필요가 있고, SVC 용량을 증대

할 필요가 있다고 사료된다.

6. 결 론

전기로 부하는 단시간 내에 전류 변화가 급격히 일어나므로 순시치 측정에 의한 고조파 및 플리커 평가는 오류를 범하기 쉽다. 시간에 따라 변하는 고조파 및 플리커를 누적확률 값을 사용하여 신뢰도를 높였다.

SVC는 전기로 부하에 신속하고 정확하게 무효전력을 보상하여 고조파 뿐만 아니라 플리커를 저감시키기 위해 설치되고 있다. SVC 투입 전후의 고조파를 측정하여 고조파 개선효과를 분석하였다.

고조파 측정은 국제기준인 IEC 61000-4-7에 따라 개발된 장비를 사용하였다. IEC 61000-3-6에 의한 고조파 전압 평가는 기준치 3.0[%]보다 작은 값(SVC 투입 전은 1.513[%], SVC 투입 후는 1.435[%])으로 분석되었고, SVC 효과로 전압 왜형률이 약 5.16[%] 감소하였다. 참고로 한전 기준치는 1.5[%]이다.

플리커 측정은 IEC 61000-4-15에 따라 개발된 장비를 사용하였다. IEC 61000-3-7에 따라 플리커를 평가하면, 기준치($P_{st}=0.8$) 보다 SVC 투입 전은 2.024으로 기준치를 초과하였고, SVC 투입 후는 1.442로 기준치를 넘었다. 국제 기준에 맞추려면 기존의 SVC를 개선할 필요가 있다고 사료된다. SVC의 플리커 개선 효과는 약 40.4[%]로 플리커가 저감되었다.

본 연구는 2008학년도 홍익대학교 학술연구진흥비에 의하여 지원되었음.

References

- [1] L. Nikoloski and G. Rafajlovski, "Power Quality Aspects of Arc Steel Melting Furnace", IEEE 10th Mediterranean Electrotechnical Conference, 2000.
- [2] R. C. Dugan, and et al., "Electrical Power Systems Quality", McGraw-Hill Co., 2003.
- [3] IEC 61000-4-7, "General Guide on Harmonics and Inter-harmonics Measurement and Instrumentation for Power Supply Systems", 1991.

전기로 부하에서 SVC의 고조파 및 플리커 효과에 관한 연구

- [4] PNA-2010, "Power Network Analyzer", Chauvin Amoux Co., 2004.
- [5] IEC 61000-4-15, "Flickermeter-Functional and Design Specification", 2003.
- [6] T. Larsson and et al., "SVC Light : A Utility's Aid to Restructuring its Grid", 2000 IEEE Power Engineering Society Winter Meeting.
- [7] B. Depommier and J. Stauley, "Static Var Compensator Upgrade in a Steel Mill", 2003 IEEE Power Engineering Society General Meeting.
- [8] Z. Zhang and et al., "Flicker Analysis and Methods for Electric Arc Furnace Flicker Mitigation", 2001 IEEE Porto Power Tech Conference.
- [9] T. Ortmeier and w. Xu, "Setting Limits on Time-Varying Harmonics", IEEE Power Engineering Society General Meeting, 2003.
- [10] M. Steurer, "Real Time Simulation for Advanced Time-Varying Harmonic Analysis", IEEE Power Engineering Society General Meeting, 2005.
- [11] IEC 61000-3-6, "Assessment of Emissions Limits for Distorting Loads in MV or HV Power Systems", 1996.
- [12] IEC 61000-3-7, "Assessment of Emission Limits for Fluctuating Loads in MV and HV Power Systems", 2003.

◇ 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.

최명범 (崔炯範)

1970년생 8월 6일생. 1999년 홍익대학교 전기공학과 졸업. 2007년~현재 홍익대학교 전력계통 연구실 박사과정.

오정석 (吳政錫)

1950년 9월 13일생. 1977년 홍익대학교 전기공학과 졸업. 2003년 충남대학교 산업대학원 졸업. 1977년~현재 전 북지방 조달청장.