

전기로 부하에서 SVC의 플리커 효과에 관한 연구

(A Study on the Flicker Effect of SVC in Electric Arc Furnace Loads)

김경철* · 진성은 · 이일무

(Kyung-Chul Kim · Seong-Eun Jin · Il-Moo Lee)

요 약

제철소에서 사용되고 있는 전기로는 전력계통에 전압 변동을 일으키며 시간에 따라 변하는 비선형 부하이다. 플리커는 전압 변동의 크기에 따라 램프의 방출 변화에 의한 인간의 지각 효과로 정의된다. 플리커 레벨은 전압 변동의 크기, 주파수 및 기간에 의해 결정된다. 본 논문에서는 전기로 부하로 인한 154[kV] 시스템에서의 전압 변동 문제를 측정하고, 플리커 저감을 위한 SVC 적용 결과를 분석하고, IEC 61000-3-7에 의하여 플리커를 평가하였다.

Abstract

An electric arc furnace being used in the steel industry is a time-varying non-linear load causing voltage fluctuations to 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 level of flicker depends on the amplitude, frequency and duration of the voltage fluctuations. In this paper, the voltage fluctuation problem in an 154[kV] system due to the electric arc furnace loads is investigated and the analysis results of the static var compensator application for the voltage flicker mitigation are presented and evaluated by the IEC 61000-3-7.

Key Words : Electric arc furnace, Flicker, Static var compensator, IEC 61000-3-7

1. 서 론

제철소는 전기로를 포함한 비선형 부하가 주 전기 설비이고, 단시간 내에 전류 변화가 급격히 일어나며 큰 전압 변동을 일으키므로 근본적으로 플리커 발생원이라 할 수 있다[1].

플리커는 장비의 효율을 저하시키고, 보호계전시스템의 장애, 토크 및 전력의 동요 등 여러 장애를 일으킨다. 그러므로 플리커는 전력회사나 수용가에게 중요한 전력 품질의 평가요소 이므로, 전력회사와 수용가가 역할과 책임을 분담하게 된다. 수용가는 공통결합점(PCC, the Point of Common Coupling)에서 전력회사가 제한하는 한계값 이하로의 방출을 유지해야 하는 책임이 있다. 전력회사와 수용가는 플리커 방출을 줄이기 위한 최적의 방법을 선정하기 위해 서로 협력해야 한다. 이러한 감소를

* 주저자 : 홍익대학교 전기공학과 교수
Tel : 041-860-2568, Fax : 041-863-7605
E-mail : yangjier@hongik.ac.kr
접수일자 : 2006년 6월 22일
1차심사 : 2006년 6월 26일
심사완료 : 2006년 7월 18일

위해 실시되는 방법의 설계와 선택은 수용가의 책임이다.

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

2. 플리커 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, #3 MTR) 95[MVA], 전기로/압연기용(#2 MTR, #3 MTR) 95[MVA]×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.

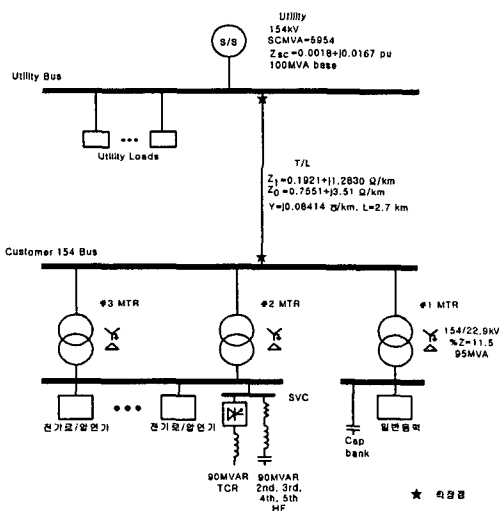


그림 1. 사례 연구 시스템의 단선도
Fig. 1. One-line diagram of the case study system

2.2 플리커 지수

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

플리커 측정에 대해 IEC 61000-4-15에서는 전압 변동 파형에 대해 정확한 플리커 지각 레벨을 표시하기 위한 기능을 설명하고 있다.

플리커 측정기의 기능은 입력 전압으로부터 램프, 눈 및 두뇌를 통과하는 인간의 플리커 지각을 시뮬레이션하여, 플리커 레벨의 통계적 분석을 수행한다.

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

단기 플리커 평가는 관찰 주기 " $T_{short} = 10$ 분"에 의한 간소한 측정이 P_{st} 에 의해 구해지고, 이는 플리커 측정기의 출력에서 얻게 되는 통계 값이다.

$$P_{st} = (0.0314P_{0.1} + 0.0525P_{1s} + 0.0657P_{3s} + 0.28P_{10s} + 0.08P_{50s})^{1/2} \quad (1)$$

여기서 백분위수인 $P_{0.1}$, P_{1s} , P_{3s} , P_{10s} 과 P_{50s} 은 관찰 기간동안의 시간에 0.1[%], 1[%], 3[%], 10[%] 및 50[%]를 초과하는 플리커 레벨이다. 접미사 "s"는 "smoothed value"를 나타낸다.

참고로 $P_{st} = 1.0$ 은 50[%]의 사람들이 플리커를 감지하는 값이고, 단위는 pu(Perceptibility Units)이다.

장기 플리커는 관찰주기 동안 1008개 이상의 단기 플리커 데이터에서 P_{lt} 를 구하여 평가되고, 전기로와 같은 부하의 장기 평가에 적합하다. T_{short} 이 10분일 때 T_{long} 은 1주일에 대응한다.

$$P_{lt} = \left(\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N P_{st}^3 \right)^{1/3} \quad (2)$$

여기서 P_{st} ($i=1, 2, \dots, N$)는 단기 가혹성 P_{st} 의 연속적인 측정값이다.

2.3 플리커 측정 장비

플리커 측정과 평가는 전력회사와 수용가가 만나

전기로 부하에서 SVC의 플리커 효과에 관한 연구

는 점, 즉 공통결합점에서 이루어지는데, 사례 연구 수용가의 모선이 된다.

시간에 따라 변하는 플리커는 IEC 61000-4-15[2]에 따라 10분 간격으로 24시간 동안 측정한다.

측정 장비는 PNA-2010[3]으로 IEC 61000-4-15에서 요구하는 조건을 갖춘 장비로 널리 쓰이고 있다.

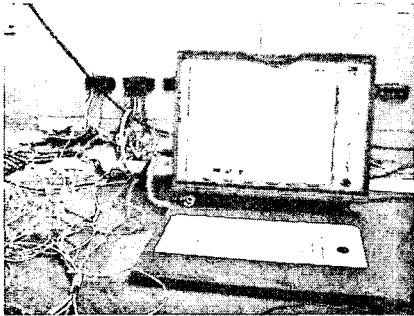


그림 2. 측정 장비
Fig. 2. Measuring equipment

2.4 SVC 투입 전 플리커 측정

SVC는 1970년대부터 플리커를 저감시키는 수단으로 널리 쓰이고 있다. SVC 설치 목적은 전기로 부하에 신속하고 정확하게 무효 전력을 보상하여 모선 전압을 일정하게 유지하고, 플리커를 저감시키는 데 있다. 고조파 필터는 고조파를 저감시키는 역할 이외에 진상 무효전력을 공급한다[4-6].

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

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
유효전력[GW]	0.026	0.029	0.026
피상전력[GVA]	0.027	0.031	0.028

그림 3은 PNA-2010 장비로 24시간 동안 측정된 P_{st} 와 P_{it} 의 시간 경향을 나타낸다.

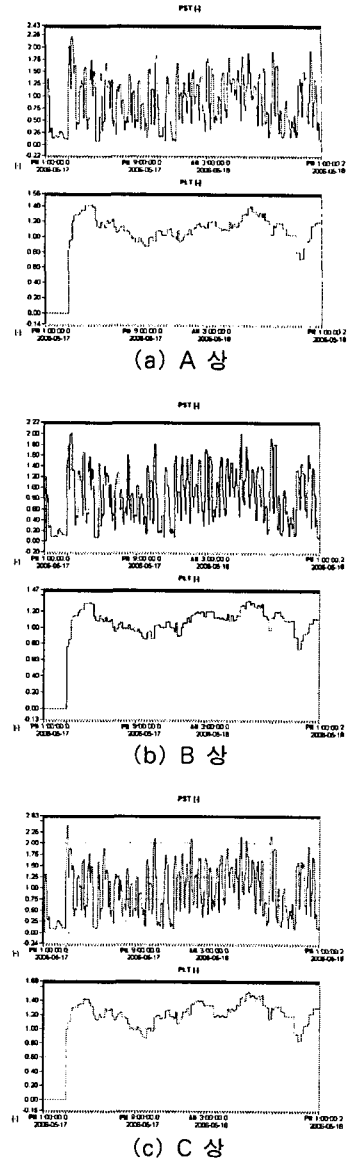


그림 3. 측정된 P_{st} 와 P_{it} 의 시간경향(SVC 투입 전)
Fig. 3. Measured P_{st} and P_{it} time trend (without SVC)

2.5 SVC 투입 후 플리커 측정

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

그림 4는 PNA-2010 장비로 24시간 동안 측정된 P_{st} 와 P_{it} 의 시간경향을 나타낸다.

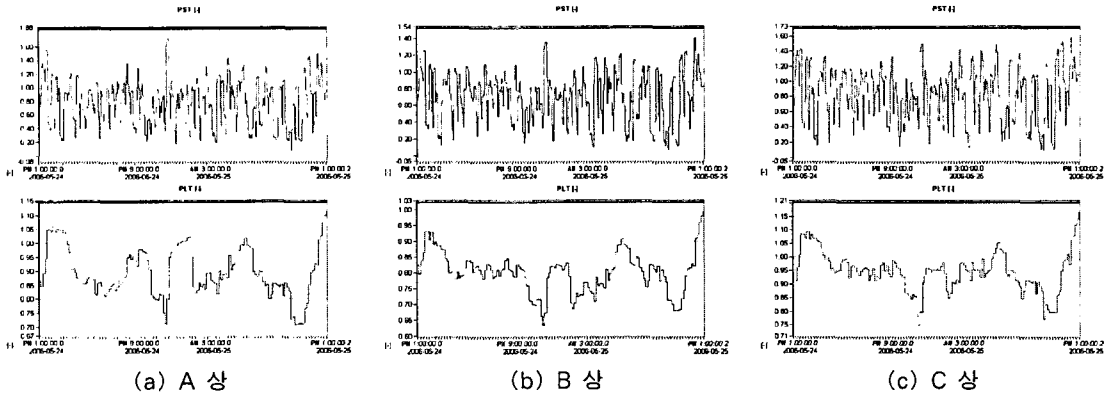


그림 4. 측정된 P_{st} 와 P_{li} 의 시간경향(SVC 투입 전)
 Fig. 4. Measured P_{st} and P_{li} time trend(without SVC)

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
유효전력[GW]	0.038	0.042	0.038
피상전력[GVA]	0.039	0.044	0.039

3. 플리커 평가

그림 3과 4에서 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(com-

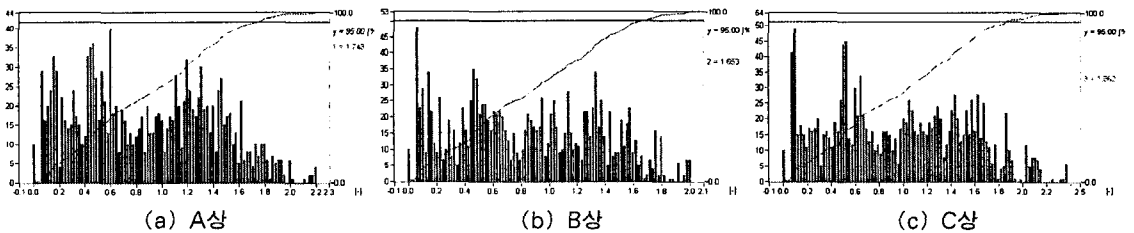


그림 5. 측정된 P_{st} 누적확률 분포도(SVC 투입 전)
 Fig. 5. Measured P_{st} cumulative probability distribution(without SVC)

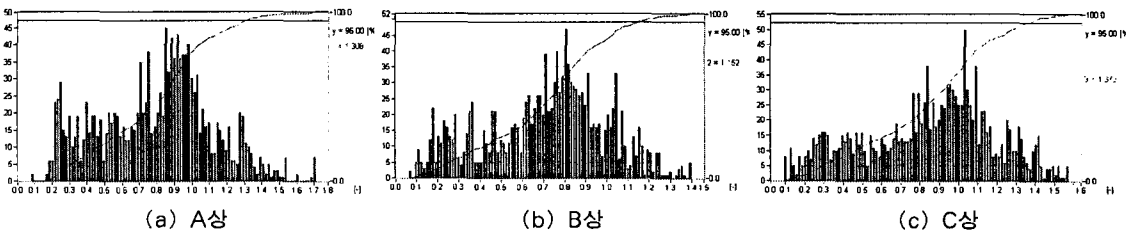


그림 6. 측정된 누적확률 분포도(SVC 투입 후)
 Fig. 6. Measured P_{st} cumulative probability distribution(with SVC)

전기로 부하에서 SVC의 플리커 효과에 관한 연구

patibility levels)에서 쓰이고, 99[%] 누적확률은 고압(35[kV]<[HV]≤230[kV])에 대한 P_{st} 및 P_{it} 한계값을 규정하는데 사용된다[7].

그림 5는 SVC 투입 전에 PNA-2010 장비로 24시간 동안 측정된 P_{st} 의 누적확률 분포도이다.

그림 6은 SVC 투입 후에 PNA-2010 장비로 24시간 동안 측정된 P_{st} 의 누적확률 분포도이다.

표 3과 4는 P_{st} 와 P_{it} 의 누적확률 데이터를 요약한 것이다.

표 3. P_{st} 누적확률 값

Table 3. P_{st} cumulative probability value

P_{st}	Without SVC			With SVC		
	A상	B상	C상	A상	B상	C상
CP 50[%]	0.863	0.827	0.955	0.851	0.751	0.883
CP 95[%]	1.748	1.653	1.862	1.308	1.152	1.372
CP 99[%]	1.991	1.956	2.124	1.536	1.299	1.491

표 4. P_{it} 누적확률 값

Table 4. P_{it} cumulative probability value

P_{it}	Without SVC			With SVC		
	A상	B상	C상	A상	B상	C상
CP 95[%]	1.349	1.281	1.449	1.407	0.904	1.067
CP 99[%]	1.406	1.321	1.495	1.074	0.956	1.115

전력시스템에 사용되는 시변 부하의 플리커 평가는 IEC 61000-3-7[7]에서 기술하고 있다. 또한 IEEE에서도 IEC 기준에 따라 플리커를 평가하고 있다[8-9].

공통결합점에서의 고압에 대한 P_{st} 및 P_{it} 의 계획레벨 지시 값은 아래와 같다.

$$P_{st} = 0.8$$

$$P_{it} = 0.6$$

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 정

확한 비교는 할 수 없었다. 표 5는 플리커 평가를 간추려 놓은 것이다.

표 5. IEC에 의한 플리커 평가

Table 5. Flicker evaluation by IEC

Flicker index	IEC 61000-3-7 Planning levels	Without SVC (average)	With SVC (average)
$P_{st99[\%]}$	0.8	2.024*	1.442*
$P_{it99[\%]}$	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 Upgrade할 필요가 있고, SVC 용량을 증대할 필요가 있다고 사료된다.

한전에서는 플리커 허용기준을 공급약관 시행세칙 제26조에 명시하고 있다. 플리커 지수 ΔV_{10} 으로 표시하여 1시간 평균치가 0.45[%]이하로 규정하고 있다. ΔV_{10} 은 전압 변동이 10[Hz]일 때 등가 플리커이다. ΔV_{10} 기준은 주로 일본에서 사용했던 플리커 지수이고, 최근에는 IEC 기준으로 변환하고 있다.

ΔV_{10} 과 P_{st} 는 측정기준에 약간의 차이는 있으나 참고문헌[6]에서는

$$P_{st} \approx 3\Delta V_{10} \quad (3)$$

으로 계산하고 있다.

표 6은 한전 기준으로 본 플리커 평가를 간추려 놓았다. 1시간 평균치의 개념과 ΔV_{10} 지수를 P_{st} 로 등가 변환시켜 보았다.

표 6. 한전기준에 의한 플리커 평가

Table 6. Flicker evaluation by KEPCO

Flicker index	KEPCO limits	Without SVC (average)	With SVC (average)
$P_{st50[\%]}$	1.35	0.882	0.828
$P_{st95[\%]}$	1.35	1.754*	1.277
$P_{st99[\%]}$	1.35	2.024*	1.442*

주] *는 기준치를 초과하는 값이다.

한전의 1시간 평균치 개념은 오류를 범하기 쉽다. 시간에 따라 변하는 변동 부하의 경우는 측정하는 시점에 따라 플리커 지수 값이 달라지기 때문이다. 국제기준에서는 최소 일주일을 권하고 있다. 대표성이 있는 값은 누적확률을 사용한다. 50[%] 누적확률은 평균치를 나타내고, 95[%] 누적확률은 IEC와 IEEE에서 대표값으로 쓰이고 있다.

95[%] 누적확률값을 한전 기준에 적용하면 SVC 투입 전은 1.754로 기준치(1.35)를 초과하지만, SVC를 투입하면 1.277로 기준치 이하로서 만족한다.

4. 결 론

전기로 부하는 단시간 내에 전류 변화가 급격히 일어나고, 큰 전압변동을 일으키는 플리커 발생원이다.

SVC는 전기로 부하에 신속하고 정확하게 무효전력을 보상하여 플리커를 저감시킨다. SVC 투입 전후의 플리커를 측정하여 플리커 개선효과를 분석하였다.

플리커 측정은 국제기준인 IEC 61000-4-15에 따라 개발된 장비를 사용하였고, 플리커 평가 지수인 P_{st} 와 P_{stL} 으로 플리커를 평가하였다.

IEC 61000-3-7에 따라 플리커를 평가하면, 기준치($P_{s,99\%} = 0.8$) 보다 SVC 투입 전은 2.024로 기준치를 초과하였고, SVC 투입 후는 1.442로 기준치를 많이 초과하였다. 국제기준에 맞추려면 기존의 SVC를 개선할 필요가 있다고 사료된다. SVC의 플리커 개선효과는 약 40.4[%]로 플리커가 저감되었다.

한전기준을 IEC 기준으로 등가화 시키면 기준치는 $P_{s,95\%} = 1.35$ 가 되고, SVC 투입 전은 1.754로 기준치를 초과하였으나, SVC 투입 후는 1.277로 기준치 이하로 허용기준을 만족하였다.

오늘날 많은 국가들이 국제기준인 IEC나 IEEE 기준을 채택하고 있으므로, 한전의 플리커 기준도 국제화 추세에 따라 재검토하여 실정에 맞는 플리커 기준 채택이 필요하다고 사료된다.

본 연구는 전력산업 연구개발사업으로 수행되었음.

References

- [1] R. C. Dugan, and et al., "Electrical Power Systems Quality", McGraw-Hill Co., 2003.
- [2] IEC 61000-4-15, "Flickermeter-Functional and Design Specification", 2003.
- [3] PNA-2010, "Power Network Analyzer", Chauvin Amoux Co., 2004.
- [4] T. Larsson and et al., "SVC Light : A Utility's Aid to Restructuring its Grid", 2000 IEEE Power Engineering Society Winter Meeting.
- [5] B. Depommier and J. Stauley, "Static Var Compensator Upgrade in a Steel Mill", 2003 IEEE Power Engineering Society General Meeting.
- [6] Z. Zhang and et al., "Flicker Analysis and Methods for Electric Arc Furnace Flicker Mitigation", 2001 IEEE Porto Power Tech Conference.
- [7] IEC 61000-3-7, "Assessment of Emission Limits for Fluctuating Loads in MV and HV Power Systems", 2003.
- [8] S. M. Halpin, et al., "Voltage and Lamp Flicker Issues : Should the IEEE Adopt the IEC Approach?", IEEE Transactions on Power Delivery July 2003.
- [9] IEEE Std. 1453-2004, "IEEE Recommended Practice for Measurement and Limits of Voltage Fluctuations and Associated Light Flicker on AC Power Systems".

◇ 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.

이일무 (李一茂)

1971년 7월 16일생. 2000년 홍익대학교 전기공학과 졸업. 2002년 동 대학원 전기공학과 졸업(석사). 2001~2004년 (주)피에스디테크 연구원. 2003년~현재 동 대학원 박사과정. 2004년 8월~현재 Micro Power 대표이사.