

# Matlab/Simulink 기반의 IEC 플리커미터를 이용한 플리커 저감효과 모의에 대한 연구

論 文

58-2-3

## Analysis of Flicker Mitigation Effects using IEC Digital Flickermeter based on Matlab/Simulink Simulation

鄭宰安\* · 趙秀桓\*\* · 權世燮\*\*\* · 張吉洙† · 姜汶昊§

(Jae-Ahn Jung · Soo-Hwan Cho · Kwon Sae Hyuk · Gilsoo Jang · Moon-Ho Kang)

**Abstract** - Flicker, also known as voltage fluctuation, is a newest problem of power quality issues, because it is caused by nonlinear loads such as electrical arc furnace and large-scale induction motor, which are country-widely used as the heavy industries of a country develop. An international standard, International Electrotechnical Commission (IEC) 61000-4-15, was published in 1997 and revised in 2003. With increasing concerns about flicker, its mitigation methods have been also studied. General countermeasures for flicker are divided into three categories: a) enhancing the capacity of supplying system, b) Series elements including series reactor and series capacitor and c) power electronic devices including static VAR compensator (SVC) and static synchronous compensator (STATCOM). This paper introduces how to mitigate the voltage flicker at the point of common coupling (PCC) and presents how to simulate and compare the flicker alleviating effects by each mitigation method, using IEC flickermeter based on the Matlab/Simulink program.

**Key Words** : IEC 61000-4-15, IEC Flickermeter, Matlab/Simulink, STATCOM, SVC

### 1. 서 론

세계적으로 전기에너지에 대한 관심이 급속히 증대되고 있는 가운데 여러 가지 관련이슈가 대두되고 있다. 신재생 에너지의 보급으로 인해 기존의 대형 전력망의 개념에서 마이크로 개념의 전력망(일명 마이크로 그리드)으로 변화하고 있으며 기존 전력망과의 연계를 위해 최소한의 전력품질이 요구되고 있다. 이는 계통 전력망의 안전도를 보장하기 위해서 매우 필수적이고 기본적인 요소이다. 결국 이와 같은 분위기는 기존의 전력품질에 대한 관심과 맞물려 그 중요성이 더욱 부각되고 있는 실정이다.

국내의 경우 다양한 전력품질 왜곡 현상에 대해서 한국전력의 공급약관을 통해 그 품질을 유지, 향상시키기 위한 노력을 꾸준히 해오고 있다. 하지만 플리커에 관련된 연구는 매우 미진한 상황이다.

플리커에 대한 이해와 측정 알고리즘의 보급을 위해 본 연구실에서는 수년에 걸쳐 관련 논문을 발표하였으며 국내에 그에 대한 관심을 고취시키기 위한 노력을 해오고 있다 [1-4].

전력품질 문제에 있어서 현상에 대한 해석도 중요하지만

그에 대한 실질적인 대책을 세우는 것도 매우 중요하다. 현상에 대한 정확한 해석을 바탕으로 발생원인과 증상을 판단할 수 있고 이를 바탕으로 전력품질을 향상시키기 위한 대책을 구축할 수 있다. 하지만 전력계통이 일반적인 시스템과는 달리 물리적으로 광역에 걸쳐 구성되어 있고 수많은 비선형 요소들로 구성되어 있기 때문에 시뮬레이션에 의한 연구가 매우 중요한 역할을 한다. 특히 전력품질 효과에 대한 연구에 있어서 측정알고리즘을 구현하여 예시 계통에 적용하는 것은 기본적인 연구 방향이다.

본 논문에서는 플리커에 대한 저감대책을 소개하고 각각의 저감대책의 효과를 Matlab/Simulink 환경 아래서 모의하는 방법을 구체적으로 소개한다. 플리커 시뮬레이션을 위해 먼저 전기아크로(Electrical arc furnace, EAF)를 포함한 시험 계통에 대해 Matlab/Simulink를 연동하여 플리커미터의 시뮬레이션을 수행하고 모의결과를 활용하여 IEC에서 규정하고 있는 플리커심각도지수인  $P_{st}$  (단기플리커 심각도지수)를 계산한다. 또한 논문에서 소개한 각각의 플리커 대책을 Simulink 환경에서 모델링한 후 위에서 소개한 플리커미터를 이용하여 계산된  $P_{st}$ 를 직접적으로 비교하여 가장 효과적인 플리커 저감대책을 선정한다.

### 2. 플리커 저감대책 [5, 6]

플리커를 발생시키는 부하의 운전의 특성에 따라 다음의 두 가지로 구분된다.

- 전압변화(voltage change)를 일으키는 부하 : 매우 짧은 듀티 사이클을 지나는 소용량 부하로서 에어컨, 냉장고, 복사기, X-레이기계, 엘리베이터 등이 여기에 속한다. 다수

\* 準 會 員 : 高麗大 工大 電氣電子電波工學科 碩士課程  
\*\* 正 會 員 : 高麗大 工大 電氣電子電波工學科 碩博士統合課程  
\*\*\* 正 會 員 : 高麗大 工大 電氣電子電波工學科 教授 · 工博  
§ 正 會 員 : 韓國電力 電力研究院 配電研究所  
† 교신저자, 正會員 : 高麗大 工大 電氣電子電波工學科 教授 · 工博

E-mail : gjang@korea.ac.kr  
接受日字 : 2008年 12月 29日  
最終完了 : 2009年 1月 9日

의 부하들이 동시에 혹은 수 분 내에 걸쳐 연속적으로 동작함으로써 플리커가 발생할 수 있다.

- 전압변동(voltage fluctuation)을 일으키는 부하 : 전류의 변화가 수 분에 걸쳐 연속적으로 일어나면서 주기적인 전압변동을 야기하는 부하로서 아크로, 저항로, 용접로, 전철 부하, 풍력터빈, 용접기 등이 여기에 속한다.

이러한 부하들이 계통의 공통접합점(PCC)에 연결되어 계통으로부터 주기적으로 많은 량의 전류를 사용함으로써 이 PCC의 하위계통 혹은 인근계통에 연결된 부하들이 플리커의 영향을 받게 된다.

플리커에 대한 일반적인 대책은 다음과 같이 세 가지로 분류되며 자세한 내용은 다음과 같다.

- 계통용량의 증대 및 선로증설
- 직렬리액터와 직렬커패시터 사용
- SVC와 STATCOM 등 전력전자 설비

**2.1 계통용량 증대 및 선로증설에 의한 저감**

일반적으로 플리커는 계통의 단락용량에 비해 상대적으로 큰 부하가 급변함에 따라 발생하기 때문에 계통의 공급용량을 증대하는 것은 가장 확실한 플리커 저감대책이라고 할 수 있다. 구체적으로는 154/22.9kV 변전소의 변압기를 대용량으로 교체 혹은 공급전압의 승압 등의 방법을 들 수 있다. 또한 플리커 발생부하를 격리시킴으로써 다른 부하에 대한 영향을 최소화시킬 수 있다.

단독선로를 통해 전력을 공급함으로써 플리커 유발부하에 의한 비선형적인 전류가 플리커 민감부하에 영향을 주는 선로임피던스에 흐르지 못하기 때문에 플리커 영향을 제거할 수 있다.

그림 1은 플리커 발생부하와 민감부하를 격리시키는 방안으로 선로의 증설에 의한 플리커 저감방안을 보여주는 단선도이다.

**2.2 직렬리액터 혹은 직렬커패시터에 의한 저감**

직렬리액터는 전기아크로에 의한 플리커를 저감하기 위해서 가장 많이 사용되는 방법이다.

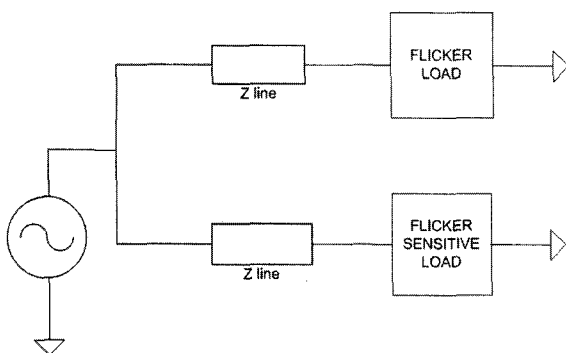


그림 1 선로 증설에 의한 플리커저감을 나타내는 단선도  
 Fig. 1 One line diagram for flicker mitigation by new distribution line

직렬로 연결된 유도성 리액턴스 성분이 아크를 안정시키고 용융이 시작되는 시점에서의 전류 변화를 줄인다. 또한 공급측 고조파 수준을 낮추는 장점도 지닌다.

직렬커패시터 역시 플리커를 완화시킨다. 부하로 전력을 공급하는 송전선에 직렬로 커패시터를 연결함으로써 선로의 유도성 리액턴스를 보상한다. 즉 계통과 부하모선 간의 임피던스를 줄임으로써 선로에서 필요한 무효전력손실을 감소시켜 전달되는 최대 무효전력량을 증가시키게 되어 전압을 안정화시킨다. 하지만 직렬커패시터의 경우 하위계통에서만 저감효과가 있으며 산업용 피더에 사용하는 경우 운전 시주의를 기울여야 한다. 또한 특정 주파수에만 효과가 있으며 불필요한 주파수 진동을 일으킨다고 알려져 있다 [5].

고정용량 커패시터 뱅크는 장기간의 전압안정도 확보와 역률보상에는 탁월하다. 하지만 병렬커패시터가 플리커 저감에 효과가 있다고 생각하는 것은 잘못된 생각이다. 순간 전압강하는 완화시킬 수 있으나 전압의 상대적 변화( $\Delta V/V$ )를 완화시키지 못하며 오히려 증대시키는 경우가 있다 [5].

그림 2은 직렬커패시터에 의한 플리커 저감방안을 보여주는 단선도이다.

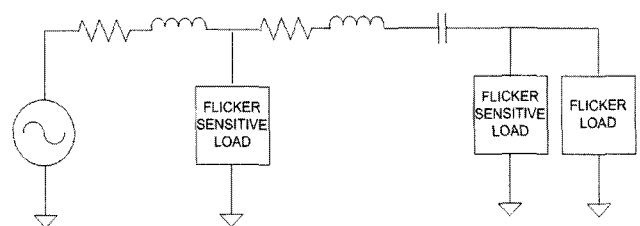


그림 2 직렬커패시터에 의한 플리커저감을 나타내는 단선도  
 Fig. 2 One line diagram for flicker mitigation by series reactor

**2.3 SVC와 STATCOM 등 전력전자 설비에 의한 저감**

**2.3.1 SVC를 이용한 플리커 저감**

SVC는 플리커저감 뿐만 아니라 역률보상, 전압안정도 개선, 상불평형 보상 등 전력계통 내에서 매우 많은 역할을 수행하고 있다.

SVC는 TSC (Thyristor switched capacitor)와 TCR (Thyristor controlled reactor)로 구성되어 있으며 TCR에서 싸이리스터의 점호각을 조절하여 유도성 리액턴스를 변화시킴으로써 소비되는 무효전력량을 제어한다. 즉 공급측으로 유입되는 무효전류를 제어함으로써 선로임피던스 간의 전압강화와 PCC에서의 전압을 제어한다. 원리를 간략하게 설명하면, 무효전력분을 사용 혹은 발생시키도록 PCC에 연결된 병렬임피던스 값을 조절함으로써 제어가 가능하다. 또한 보상기 임피던스와 직렬로 연결된 싸이리스터의 점호각을 조절하여 임피던스 값을 다양하게 변경할 수 있다 [6].

**2.3.2 STATCOM을 이용한 플리커 저감**

STATCOM과 같이 전력전자소자를 이용한 컨버터를 이용해서 유/무효전력의 주입을 조절함으로써 플리커 문제를

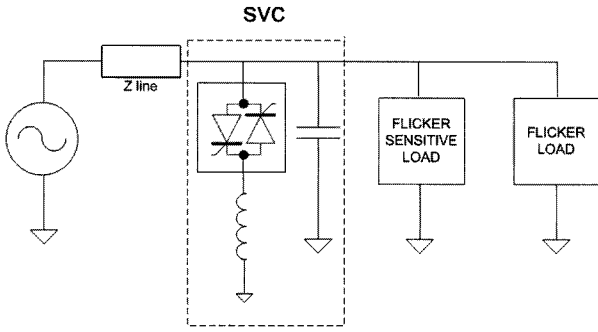


그림 3 SVC에 의한 플리커저감을 나타내는 단선도  
Fig. 3 One line diagram for flicker mitigation by SVC

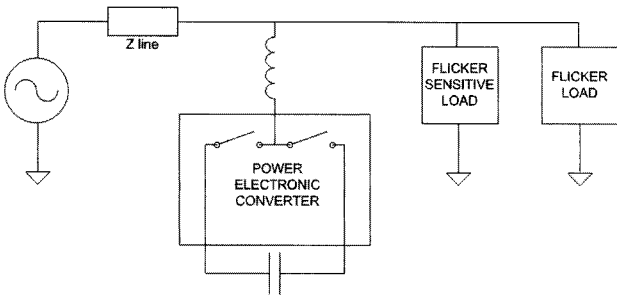


그림 4 STATCOM에 의한 플리커저감을 나타내는 단선도  
Fig. 4 One line diagram for flicker mitigation by STATCOM

해결할 수도 있다.

또한 에너지 저장장치와 연결함으로써 계통에서의 유효전력 조류를 조절할 수 있으며 다른 장비에 비해 훨씬 넓은 주파수대역을 지닌다는 점에서 앞에서 다룬 SVC보다 그 활용성이 훨씬 넓다고 할 수 있다.

하지만 초기 설치비용과 유지비용이 매우 높아 경제적인 면에서 경쟁력이 떨어진다. 또한 에너지 저장장치를 동시에 사용하는 경우 가격이 더욱 상승하는 요인이 된다.

결과적으로 유효전력보상이 필요하거나 SVC의 보상속도에 만족하지 못하는 경우를 제외하곤 플리커 저감에는 주로 SVC가 사용된다.

### 3. Matlab/Simulink를 이용한 플리커 측정모의

플리커 측정에 관한 모의는 Matlab/Simulink에 의해 효율적으로 수행될 수 있다 [4]. 또한 Simulink에서 제공하는 SimPowerSystem은 PSCAD와 같은 전력계통 시뮬레이터와 비교하여 손색이 없을 정도로 다양한 모듈을 제공하고 있으며 Signal Processing Toolbox와 같은 툴박스와 연동할 경우 더욱 강력한 툴이 될 수 있다. 참고적으로 본 논문은 시뮬레이션 결과를 보이기 위한 것이므로 모듈 제작과 같은 내용은 참고문헌 [4]를 참고한다.

플리커 측정을 위한 알고리즘은 IEC 표준에 따른 것으로 크게 두 부분으로 나뉜다 [4, 7].

- a) 순간플리커레벨(Instantaneous flicker level, IFL) 계산
- b) 단기플리커심각도지수(Short-term flicker severity, P<sub>st</sub>) 계산

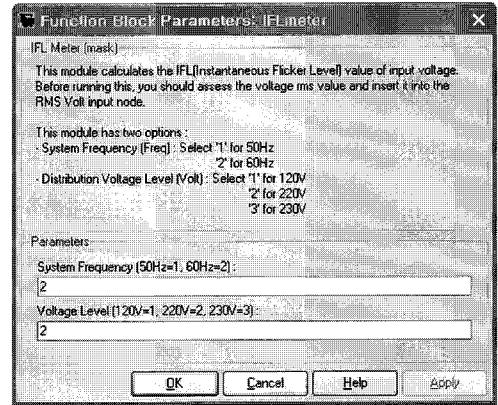


그림 5 IFLmeter 모듈 모습(좌)과 IFLmeter의 기능블록(우)  
Fig. 5 Module appearance of IFLmeter (left) and its function block (right)

이 두 부분은 계산 방법상 구분된다. IFL은 전압신호로부터 수차례의 필터링을 통해 파형으로 구해지면 P<sub>st</sub>는 IFL신호를 누적확률함수와 같은 통계처리를 통해 계산되므로 a)는 Simulink에 의해, b)는 Matlab에 의해 효율적으로 구현될 수 있다. a)를 구현하기 위해서 IFLmeter라고 하는 모듈을 이용한다 [4].

그림 5는 Simulink환경에서 구현된 IFLmeter를 보여준다.

Simulink를 이용하여 관심 전력계통을 등가적으로 구현한 후 그림 5의 IFLmeter를 PCC에 삽입하여 실행한다. 실행이 종료되면 동시에 Matlab의 workspace에 IFL신호가 생성되고 Callback 기능을 통해 P<sub>st</sub>값을 계산하도록 구현된 m-file을 자동으로 실행시킨다. 계산이 종료되면 Matlab의 명령창에 계산된 P<sub>st</sub>값이 나타난다.

플리커 측정 알고리즘의 구현과 함께 핵심이 되는 모듈은 아크로(EAF) 모델이다. Simulink 환경에서 구동되는 EAF 모델을 구현해야 한다. 참고문헌 [4]에서는 Chua's circuit을 이용한 모델을 소개하였으나 본 논문에서는 간략한 모델을 소개한다. 아크로 저항은 다음과 같이 표현된다.

$$R_{EAF} = R_0(1 + \sin \omega t) \quad (1)$$

여기에서  $\omega = 2\pi f$ 이며  $f$ 는 플리커주파수를 의미한다. 이 주파수는 가장 민감한 주파수로 8.8Hz를 채택하였으며 적절한  $R_0(3.2m\Omega)$ 을 선택하여 그림 6과 같은 EAF모델을 구현하였다 [8]. 또한 그림 6의 subsystem을 이용하여 3상 아크로 모듈을 그림 7과 같이 구성하였다.

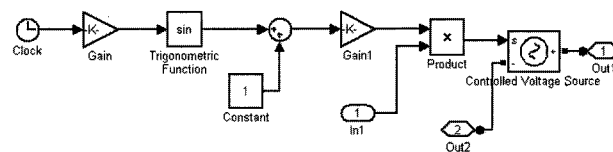


그림 6 비선형 시변 아크로저항의 subsystem 모델  
Fig. 6 Subsystem model of the non-linear and time-varying arc furnace resistance

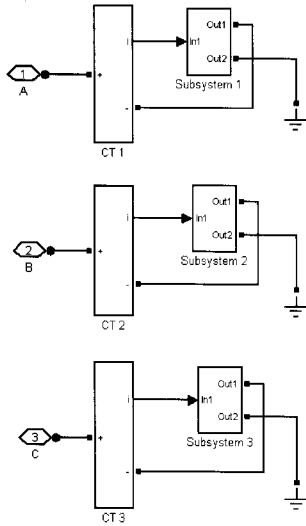


그림 7 3상 아크로 모델  
Fig. 7 3-phase EAF model

#### 4. 플리커 저감대책 모의 및 결과분석

앞 절에서 설명한 다양한 플리커 저감대책을 Matlab/Simulink로 모의하고 그 결과를 분석해 보았다.

그림 8은 모의를 위해 구성된 예시 계통이다. 계통도에서 공급전압은 154kV이고 변압기는 154/22.9kV를 사용하였다.

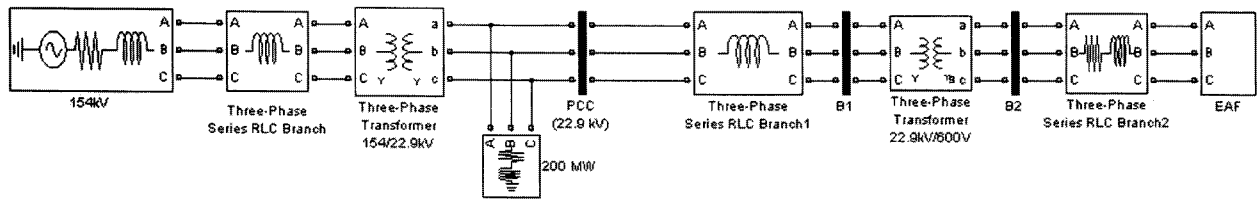


그림 8 모의를 위해 구성된 예시 계통  
Fig. 8 Basic power distribution system for simulation

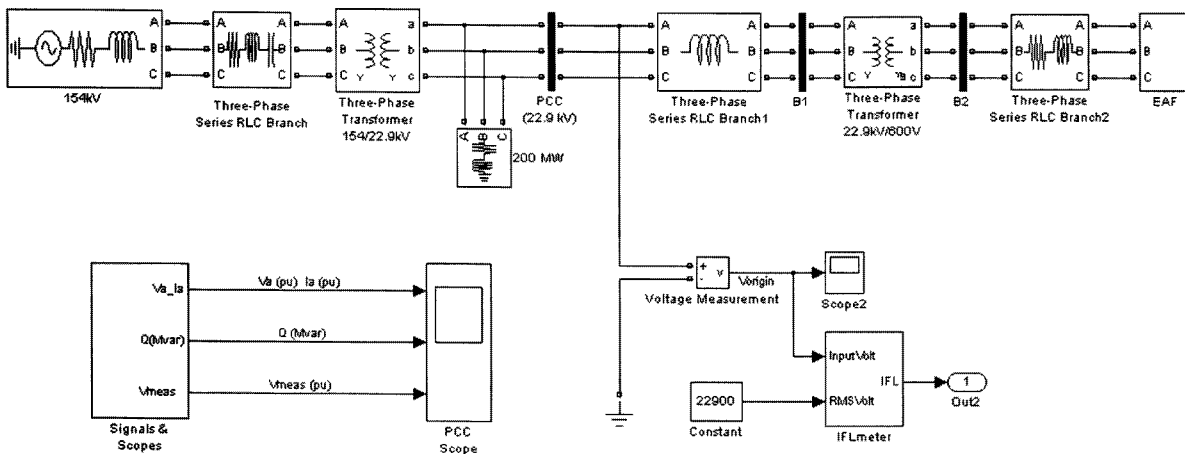


그림 9 플리커측정을 위한 IFLmeter를 설치한 모습  
Fig. 9 IFLmeter combined in the basic distribution system

그림 9는 기본계통을 구성한 후 본 논문에서 구현한 IFLmeter를 PCC 2차측에 설치한 모습을 보여준다. 이 때 계산된  $P_{st}$  값은 1.1094로, 인근 지역의 배전말단에서 감지할 수 있을 정도의 플리커가 발생하는 상황임을 알 수 있다.

#### 4.1 계통 용량 증설에 의한 플리커 저감효과 모의

계통의 용량 증설을 모의하기 위해서 그림 9의 계통에서 배전 변압기(Three phase transformer 154/22.9kV)의 용량을 20, 40, 60%로 단계적으로 증가시키면서 그 계산된  $P_{st}$  값을 모의한 결과는 1.0339, 0.9793 그리고 0.9382였다. 기존 대책에서 예측할 수 있듯이 계통의 용량이 증대될수록 측정되는 플리커지수의 크기가 감소됨을 알 수 있다. 하지만 배전 계통의 용량을 증대시키는 경우 관심 계통만의 계통 특성뿐만 아니라 아크로의 용량 및 부하 특성 등 여러 가지 운전조건들을 감안해야 하므로 실제의 경우마다 다른 결과를 보일 수 있다.

#### 4.2 직렬커패시터에 의한 플리커 저감효과 모의

직렬커패시터를 모의하기 위해서 그림 9의 계통에서 배전 선로(PCC와 B1사이의 선로, Three phase transformer)의 선로임피던스를 조절하면 된다. 즉 선로임피던스의 유도성 리액턴스값이 직렬커패시터에 의해 상쇄되도록 하여 실제로 선로를 순수 저항으로 간주한다.

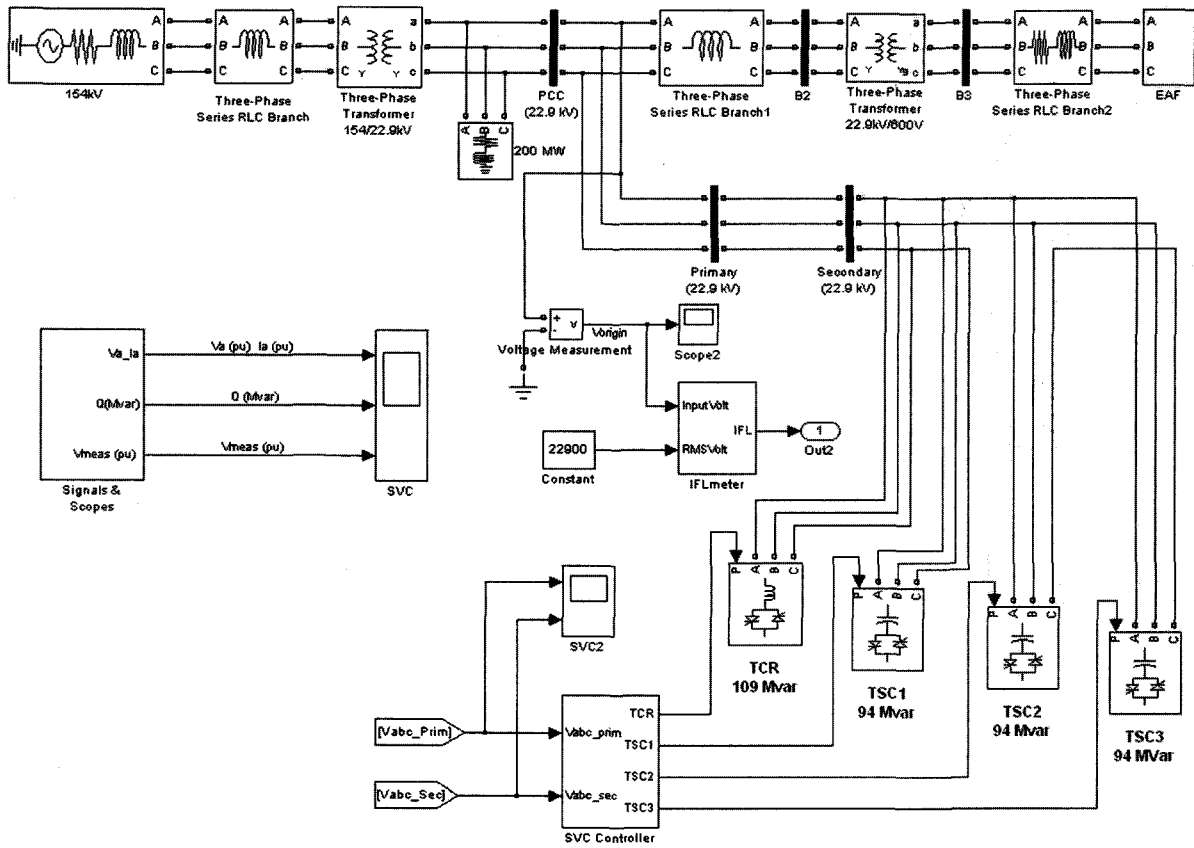


그림 10 예시계통에 SVC가 설치된 경우  
 Fig. 10 Simulink simulation of flicker mitigation by SVC

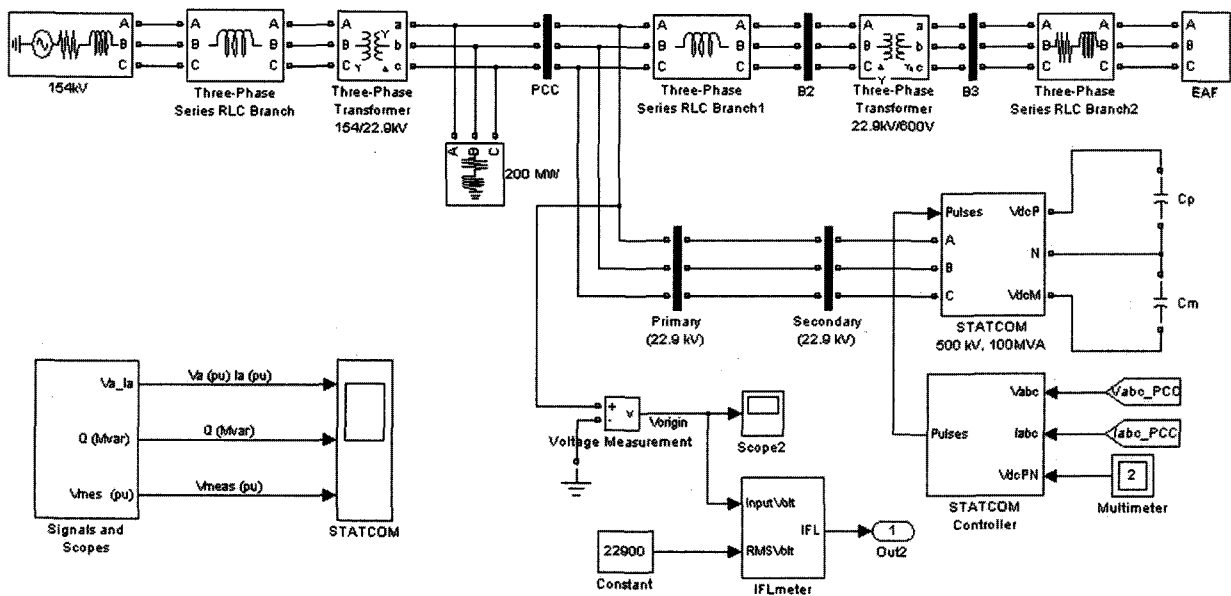


그림 11 예시계통에 STATCOM이 설치된 경우  
 Fig. 11 Simulink simulation of flicker mitigation by STATCOM

그 계산된  $P_{st}$  값을 모의한 결과는 0.9764로 용량을 증대시키는 경우와 비교하여 더 나은 개선효과는 보이지 못한다.

### 4.3 SVC/STATCOM에 의한 플리커 저감효과 모의

SVC과 STATCOM의 모델의 경우 Simulink에서 제공하고 있는 모델을 사용하였다. 플리커 저감을 위한 보상장치를 관심 PCC 모선의 2차 측에 연결하였으며 3상 평형으로 동작한다는 가정 하에 A상에 IFLmeter를 부착하여  $P_{st}$ 값을 계산하였다. 그림 10과 11은 각각 SVC와 STATCOM이 연결된 계통도를 보여준다.

$P_{st}$  값을 모의한 결과는 각각 0.8672와 0.4252로 두 경우 모두 계통용량의 증설 및 직렬커패시터에 의한 보상효과 보다 좋음을 알 수 있다. 그 중에서도 STATCOM의 플리커 저감효과가 매우 탁월함을 알 수 있다.

## 5. 결 론

아크로 부하는 매우 짧은 시간 동안에 많은 진류를 사용하여 급격한 전류 변화를 야기한다. 이는 곧 단락사고와 그 양상이 유사하여 인근부하에 큰 영향을 미치게 된다. 제련 공정과 같이 그 운전 주기가 규칙적인 경우 인근부하에 주기적인 전압변동을 초래하여 플리커라고 하는 품질왜곡현상을 일으킨다. 이러한 플리커 현상은 계통용량의 증대, 직렬 커패시터 사용, 전력전자 기반의 스위칭 소자장비를 사용하여 실질적으로 저감될 수 있다.

본 논문에서는 이러한 다양한 플리커 저감기법의 특성들을 소개하였으며 각각에 대한 플리커 저감효과를 Simulink 시뮬레이션을 통하여 비교하였다. 결과적으로 플리커 저감에 가장 효과적인 방법은 STATCOM임을 표 1을 통해서 확인할 수 있다. 또한 각각의 케이스를 직접 Simulink로 작성하여 구현하였고 관련 다이어그램을 소개하였기 때문에 앞으로의 연구에 대한 좋은 본보기로 사용될 수 있다. 예를 들어 순간전압 강하와 같은 품질 문제에 대한 저감효과에 대한 분석에도 활용될 수 있다.

표 1 플리커 저감 대책 시뮬레이션 결과

Table 1 Simulation results of flicker mitigation methods

플리커 저감대책		계산된 $P_{st}$ 값
저감대책 적용 전		1.1094
계통용량 증설	20 %	1.0339
	40 %	0.9793
	60 %	0.9382
직렬커패시터		0.9764
SVC		0.8672
STATCOM		0.4252

## 참 고 문 헌

- [1] S.H. Cho, Y.S. Jang, G. Jang, S.H. Kwon, Y.S. Jeon, N.H. Kwak and J.B. Choo, "Voltage Flickermeter for Korean Electrical Distribution System", International Conference on Electrical Engineering (ICEE) 2005, Kunming, China, July 10-14, 2005.
- [2] S.H. Cho, Y.S. Jang, G. Jang, S.H. Kwon, Y.S. Jeon, N.H. Kwak and S.W. Lee, "Application of IEC Flicker Standards to Korean Distribution System", IEEE PES General Meeting, Montreal, Canada, June 18-22, 2006
- [3] S.H. Cho, J.A. Jung, G. Jang, S.H. Kwon and M.H. Kang, "Experimental Verification of 220V Incandescent Lamp Characteristics for the IEC Flickermeter", International Conference on Harmonics and Quality of Power(ICHQP) 2008, Wollongong, Australia, Sept. 28-Oct. 2, 2008
- [4] S.H. Cho, J.A. Jung, G. Jang, S.H. Kwon and M.H. Kang, "Development of Matlab/Simulink Module for Voltage Flicker Simulation in Distribution Power System," Journal of Electrical Engineering & Technology, Vol. 3, No. 3, pp. 314-319, 2008.
- [5] R.C. Dugan, M.F. McGranaghan, S. Santoso and H. W. Beaty, Electrical Power System Quality, 2nd edition, McGraw-Hill Co., 2003
- [6] P. Kundur, Power System Stability and Control, McGraw-Hill Co., 1994
- [7] IEC 61000-4-15, Electromagnetic Compatibility (EMC)-Part 4: Testing and measurement techniques-Section 15: Flickermeter-Functional and design specifications, Ed. 1.1, 2003
- [8] Y.F. Wang, J.G. Jiang, L.S. Ge and X.J. Yang, "Mitigation of Electric Arc Furnace Voltage Flicker Using Static Synchronous Compensator," IPERC 2006

## 저 자 소 개



### 정재안 (鄭宰安)

1981년 2월 일생. 2007년 고려대 전기전자전파공학과 졸업, 2007년~현재 동 대학원 전기전자전파공학과 석사과정 재학 중

Tel : 02-3290-4739

Fax : 02-3290-3692

E-mail : bsang317@korea.ac.kr



**조수환 (趙秀桓)**

1976년 10월 28일생. 2002년 고려대 전기공학과 졸업. 2002~2004년 삼성전자 무선사업부 근무, 2004년~현재 동 대학원 전기전자전파공학과 석박사통합과정 재학

Tel : 02-3290-4739

Fax : 02-3290-3692

E-mail : joswany@korea.ac.kr



**장길수 (張洁洙)**

1967년 10월 26일생. 1991년 고려대 전기공학과 졸업. 1994년 동 대학원 전기공학과 졸업(석사). 1997년 美 Iowa 주립대 대학원 전기컴퓨터공학과 졸업(공학). 현재 고려대 전기전자전파공학과 교수

Tel : 02-3290-3246

Fax : 02-3290-3692

E-mail : gjang@korea.ac.kr



**권세혁 (權世爓)**

1949년 5월 4일생. 1974년 서울대 공업교육과 졸업. 1976년 동 대학원 공업교육과 졸업(교석). 1980년 美 Iowa 주립대 대학원 전기컴퓨터공학과 졸업(공학). 1984년 동 대학원 전기컴퓨터공학과 졸업(공학). 현재 고려대 전기전자전파공학과 교수

Tel : 02-3290-3220

Fax : 02-3290-3692

E-mail : shkwon@korea.ac.kr



**강문호 (姜汶昊)**

1969년 6월 21일생. 1994년 울산대 전기공학과 졸업. 1996년 동 대학원 전기공학과 졸업(공학). 2003년 충남대 대학원 전기공학과 박사과정수료. 2000년~현재 한국전력 전력연구원 배전연구소 근무

Tel : 042-865-5924

Fax : 042-865-5904

E-mail : mhkang@kepco.co.kr