

## 전기설비의 플리커 저감을 위한 TCR 시뮬레이션

이 출기\*\*, 강 창섭\*, 윤 철섭\*, 손 재현\*\*  
 \*한국전기안전공사 부설 전기안전시험연구원, \*\*영동전문대학

### TCR simulation for flicker suppression of electrical equipment

Hong-Gee Lee\*\*, Chang-Seob Kang\*, Chul-Sub Yoon\*, Jae-Hyun Son\*\*  
 \*Electrical Safety Laboratory Research Institute, \*\*Yeong Dong College

**Abstract** - Flicker embrace all diverse effects of rapid voltage fluctuation. To minimize these effects, the voltage fluctuation must be kept below the limit. The aim of this study is to simulate TCR for flicker suppression. To do this, we built models similar to electrical systems of fields using EMTP and attached TCR to them. After attaching TCR, we confirmed reduction of incoming voltage fluctuation and reactive power compensation.

$$I_{LF}(\alpha) = \left(\frac{2}{\pi}\right) I_{L0} \left[ \left(\frac{2}{\pi}\right) - \alpha - \left(\frac{1}{2}\right) \cdot \sin 2\alpha \right] \quad (\text{식 } 2)$$

또한, 고정 캐패시터 뱅크와 사이리스터 제어형 리액터의 전류  $I_L$  및  $I_C$ 의 결과로 나타나는 보상전류  $I_{COM}$ 은 (식 3)과 같이 나타낼 수 있다.

$$I_{COM} = I_C - I_{LF} = I_C - I_{L0} + \left(\frac{2}{\pi}\right) \cdot I_{L0} \cdot \left[ \alpha + \left(\frac{1}{2}\right) \cdot \sin 2\alpha \right] \quad (\text{식 } 3)$$

## 1. 서 론

아크로, 접용접기, 압연기 등과 같이 부하가 급변하는 전기설비는 전압변동을 수반하게 된다. 이러한 전압변동으로 인하여 전등이나 형광등의 밝기가 변하고, 이러한 현상이 반복되는 정도에 따라서 사람의 눈에 명멸현상을 느끼게 되는데, 이러한 여러 가지 현상을 일반적으로 플리커(Flicker)라 하며, 부하기기 및 계통에 조명 깜박임, 이상음, 과열 및 절연열화 등과 같은 여러 가지 장애를 일으킨다.

본 논문에서는 플리커 저감대책으로써 응답특성, 유지, 보수 및 효율 측면에서 우수한 TCR (Thyristor Controlled Reactor)을 이용하여 무효전력 변동분을 흡수하는 방법을 모의하였다. 이를 위하여, EMTP (Electromagnetic Transients Program)을 이용하여 실제 수용가의 계통모델을 구성하고, 여기에 TCR을 설계·부착하여 설치 전·후의 수전점의 전압 및 유효전력을 산출하여 플리커 저감효과를 검증하였다.

## 2. 본 론

### 2.1 TCR 설계이론

TCR은 그림 1과 같이 진상 캐패시터, 리액터와 사이리스터 스위치로 구성되어, 역병렬 접속된 사이리스터에 의해 통전 위상각을 제어함으로써 병렬리액터의 용량을 부하변동에 대응하도록 조절하여 간접적으로 부하의 무효전력을 보상한다. 즉, 최대 진상보상이 필요할 경우에 사이리스터는 오프되고 캐패시터 전류가 전원측으로 흐른다. 보상 요구가 없을 경우에는 사이리스터는 리액터의 정격전류를 흐르게 하여 캐패시터 전류를 상쇄한다.

TCR의 기본동작은 트리거 신호가 있을 때, 사이리스터  $CR1$ 과  $CR2$ 가 동작을 시작하고 아크로 무효전류의 크기에 따른 점호각  $\alpha$ 의 변동각도( $\alpha_0 \sim 90^\circ$ )에 의해 리액터 전류가 제어된다. 점호각  $\alpha$ 에 따른 리액터는 (식 1)과 같이 나타낼 수 있다.

$$I_L(t) = I_{L0}(\sin \omega t - \sin \alpha), \quad (\alpha \leq \omega t \leq \pi - \alpha) \quad (\text{식 } 1)$$

여기서,  $I_{L0}$ 는  $\alpha=0$ 일 때, 즉 리액터 전류의 피크치를 나타내며, 리액터 전류  $I_{LF}$ 의 기본성분은  $I_L(t)$ 를 푸리에 급수로 분석함으로써 나타낼 수 있다.

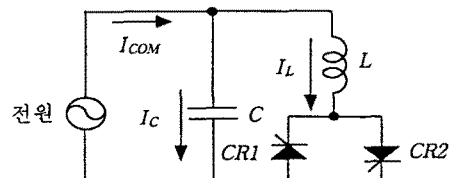


그림 1 TCR의 동작원리

### 2.2 EMTP 설계

#### 2.2.1 가변부하 모델

본 연구에서는 아크로, 용접기 등과 같이 불규칙하고 급격하게 변동하는 가변부하를 모의하기 위하여 EMTP의 TACS(Transient Analysis of Control System : 제어계의 과도현상 해석 프로그램)를 이용하였다. 기본원리는 그림 2와 같다.

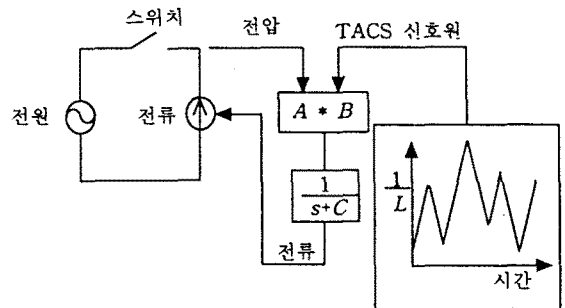


그림 2 가변부하 모델

그림 2와 같이 가변부하를 TACS 신호원을 이용하여 전류가 시간에 따라 변화하는 전류원의 형태로 모의하였다. 아크로를  $R-L$  직렬부하로 가정하고 이에 대한 전압, 전류의 관계식을 라플라스 영역에서 표현하면 (식 4) 및 (식 5)와 같다.

$$G(s) = \frac{K(s)}{E(s)} = \frac{1}{Ls+R} = \frac{1}{L} \frac{1}{s + \frac{R}{L}} \quad (\text{식 } 4)$$

$$\therefore K(s) = E(s) \frac{1}{L} \frac{1}{s + \frac{R}{L}} \quad (\text{식 } 5)$$

또한 부하전력 P 는 (식 6)과 같이 나타낼 수 있다.

$$P = I^2 R = \frac{V^2}{R^2 + (\omega L)^2} R \quad (\text{식 6})$$

$$= \frac{1}{\omega L} \frac{V^2}{\left(\frac{R}{\omega L}\right) + \left(\frac{\omega L}{R}\right)} = \frac{1}{\omega L} \frac{V^2}{\left(\frac{P}{Q}\right) + \left(\frac{Q}{P}\right)}$$

$$\therefore \frac{1}{L} = \frac{\omega P}{V^2} \left(\frac{P}{Q} + \frac{Q}{P}\right) \quad (\text{식 7})$$

또한, 모의실험을 위한 가변 부하의 모의는 무효전력에 대한 유효전력의 비와 동일 시점에서의 부하전압을 초기조건으로 설정하였다. 따라서, 그림 2의 전압(A)는 초기조건에서 주어진 부하의 전압을 의미하고, TACS 신호원(B)는 (식 7)을 이용하여 구한  $\frac{1}{L}$  을 나타낸다.

또한  $1/(s + \frac{R}{L})$  에서  $\frac{R}{L}$  (C)은 초기조건에서 주어진 무효전력에 대한 유효전력의 비에 의해서 구한다.

### 2.2.2 TCR 모델

TCR 모델에서 고정 캐패시터는 단순 회로소자로 표현하고, TCR에 흐르는 전류 I(t)는 (식 8)과 같이 사이리스터 통전기간 동안의 전압을 적분하여 계산하였다.

$$I(t) = \frac{1}{L} \int_a^{a+\sigma} V(\omega t) d\omega t = \frac{V}{\omega L} (\sin \sigma - \cos \omega t) \quad (\text{식 8})$$

$$a \leq \omega t \leq a + \sigma \quad (\text{단, } a : \text{점화각, } \sigma : \text{통전각})$$

한편 TCR 에서는 적절한 고조파 필터에 의해 기본 주파성분만 계통에 공급하므로, (식 8)에서 I(t)의 기본 주파성분은 푸리에 변환을 이용하여 다음과 같이 구할 수 있다.

$$I_1 = \frac{V_{RMS}}{\omega L} \left( \frac{\sigma - \sin \sigma}{\pi} \right) \quad (\text{식 9})$$

TCR에 흐르는 전류는 모션전압에 의해 조정되는 사이리스터 점화각에 따라 달라지는데, 이는 TCR의 인덕턴스가 가변 리액터로 동작하여 L에서 무한대까지 변하는 것으로 해석하여 (식 10)로 표현하였다.

$$v(t) = \frac{L}{k} \frac{di(t)}{dt}, \quad 0 \leq k \leq 1 \quad I(s) = \frac{k}{L} \frac{V(s)}{s} \quad (\text{식 10})$$

(식 10)에서  $\frac{k}{L}$  는 모션전압의 기준전압에 대한 오차를 적분하여 TCR의 전류를 제어하는 요소이므로, 다음과 같은 오차 적분식에 의해 구할 수 있도록 프로그램을 설계하였다.

$$\frac{k}{L} = K \cdot \int_0^{2T} \Delta V dt \quad (\text{식 11})$$

단, K : 적분이득, ΔV : 전압오차 (= 모션전압-기준전압)

## 2.3 TCR 시뮬레이션

### 2.3.1 아크로 설비 모델

그림 3은 현장실측 계통도이며, 주된 부하는 아크로이다. 계통모델의 기기 사양은 표 1에 나타내었고, 전압변동이 그림 4와 같이 심하게 나타나고 있다. 그림 4에서 전압변동이 심한 0.4(sec) 동안의 데이터를 추출하여 확대하면 그림 5와 같이 된다. 따라서, 이 전압변동과 이때의 유효전력과 무효전력의 비를 TACS 에서의 가변 부하 초기조건으로 설정하여 입력 데이터로 사용하였다. 여기서, 가변부하 조건은 전압변동이 0~100[msec]는, -6~-0.5[V]로, 100~200[msec]는 -0.5~-6.2[V]로, 200~300[msec]는 -6.2~-5[V]로, 300~400[msec]에서 -5~-6[V]로 변동하며, 동일시점에서의 유효전력과 무효전력의 비를 각각(2.55→3.04→2.51→2.63→2.70)로 변화하도록 입력을 주었다.

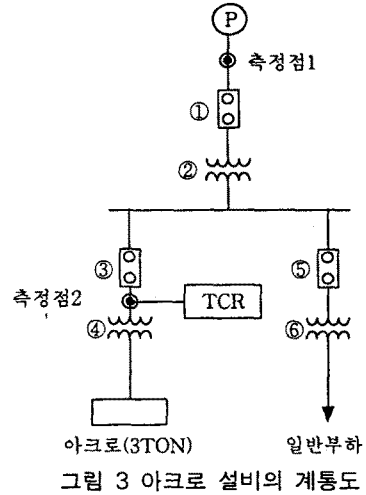


표 1 아크로 설비의 기기 사양

No.	기기명	기기정격	기기용량	비고
①	차단기	24kV/600A	520 MVA	V.C.B
②	변압기	22.9/3.3kV	3Φ 2,250kVA	Δ-Δ
③	차단기	3.6kV/1,250A	25kA	M.O.C.B
④	변압기	3,300/100~160V	3Φ 2,000kVA	Δ-Δ
⑤	차단기	3.6kV/1,250A	25kA	M.O.C.B
⑥	변압기	3,300/220~380V	3Φ 200kVA	Δ-Y

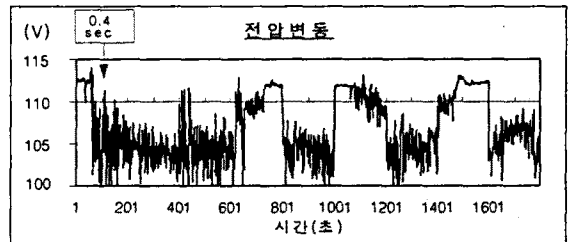


그림 4 아크로 설비 모델의 전압변동

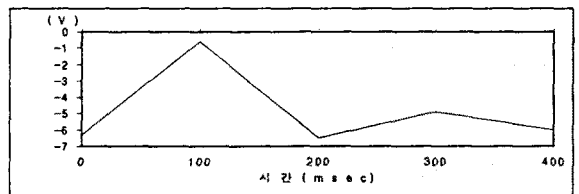
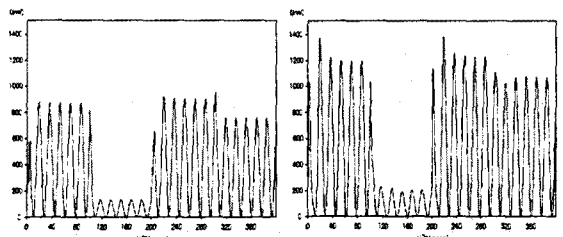
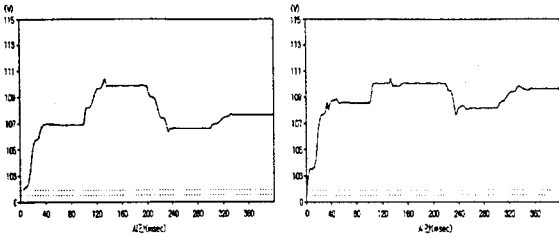


그림 5 아크로 설비 모델의 가변부하

그림 6 및 7과 같이 TCR 설치 전·후를 비교하면 유효전력은 최대부하 사용시점에서 약 300[kW], 수전점의 전압변동은 110[V] 기준으로 약 2[V] 가량 보상됨을 볼 수 있다.



(a) TCR 설치 전 (b) TCR 설치 후  
그림 6 측정점 ②의 유효전력



(a) TCR 설치 전 (b) TCR 설치 후  
그림 7 측정점 ①(수전점)의 전압 실효치

### 2.3.2 용접기 설비 모델

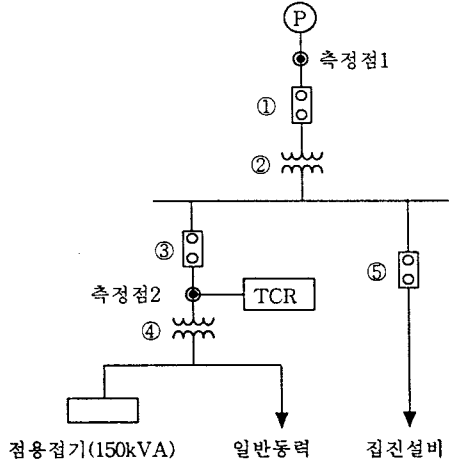


그림 8 용접기 설비의 계통도

그림 8은 현장실측 계통도이며 주된 부하는 용접기이다. 계통모델의 기기 사양은 표 2에 나타내었고, 전압변동이 그림 9와 같이 심하게 나타나고 있다.

표 2 용접기 설비의 기기 사양

No.	기기명	기기정격	기기용량	비고
①	차단기	24kV/600A	520 MVA	
②	변압기	22.9/3.3kV	3 $\phi$ 2,000kVA	$\Delta$ - $\Delta$
③	차단기	3.6kV/1,250A	25VA	
④	변압기	3,300/220V	3 $\phi$ 1,000kVA	$\Delta$ -Y
⑤	차단기	3.6kV/400A	8kA	

그림 9에서 전압변동이 가장 심한 부분의 데이터를 0.4(sec) 동안 추출하여 확대하면 그림 10과 같이 된다. 따라서, 이 전압변동과 이때의 유효전력과 무효전력의 비를 TACS 에서의 가변부하 초기조건으로 설정하여 입력데이터로 사용하였다. 여기서, 가변부하 조건은 전압변동이 0~100[msec]는 8.2~-10[V]로, 100~200[msec]는 -10~8[V]로, 200~300 [msec]는 8~-8.5[V]로, 300~400[msec]는 -8.5~8.2[V]로 변동하며, 동일시점에서의 유효전력과 무효전력의 비를 각각(3.14 → 2.41 → 3.09 → 2.38 → 3.05)로 변화하도록 입력을 주었다.

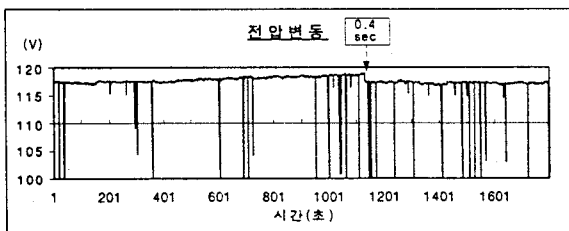


그림 9 용접기 설비 모델의 전압변동

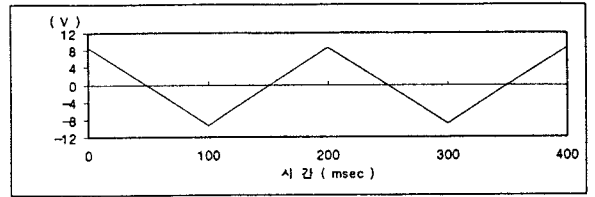
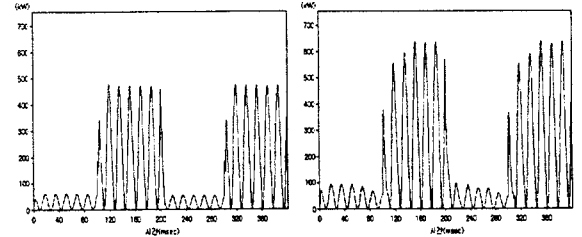
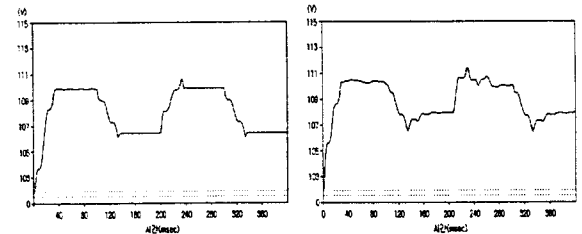


그림 10 용접기 설비 모델의 가변부하

그림 11 및 12와 같이 TCR 설치 전·후를 비교하면 유효전력은 최대부하 사용시점에서 약 100(kW), 수전점의 전압변동은 110[V] 기준으로 약 1.5[V] 가량 보상됨을 볼 수 있다. 그러나, 아크로 설비 모델과 비교하여 보면 전압변동의 보상이 매우 불안정하게 이루어짐을 알 수 있다.



(a) TCR 설치 전 (b) TCR 설치 후  
그림 11 측정점 ②의 유효전력



(a) TCR 설치 전 (b) TCR 설치 후  
그림 12 측정점 ①(수전점)의 전압 실효치

## 3. 결 론

본 논문에서는 EMTP를 이용하여 실제 수용가를 모델링하고 여기에, TCR을 설치하여 부하의 무효전력 보상을 모의하였다. 그 결과, 급격한 부하변동에 의해 발생하는 수전점의 전압변동이 감소하였고, 유효전력 또한 증가하여 무효전력 보상효과를 확인할 수 있었다. 그러나 아크로와 용접기 모델을 비교하여 보면, 전압변동 및 무효전력 보상 측면에서 용접기와 같이 전압변동의 폭이 매우 큰 부하에서는 상대적으로 그 폭이 적은 아크로에 비하여 그 효과가 떨어졌다. 따라서, 플리커 저감 대책 적용시 각 대책간의 장·단점을 비교·분석하여 두 가지 이상의 저감대책을 병용하여 사용하거나 부하의 운용방식 변경 등 다양한 접근을 통하여 실제 현장조건을 기초로 계통 및 부하별 플리커 저감대책에 대한 지속적인 연구가 이루어져야 할 것으로 사료된다.

### (참 고 문 헌)

- [1] 일신전기 고전압개발부, "Thyristor Var Compensation for Flicker Suppression", 일신전기기보, Vol.24 No.3, pp108-109, 1979
- [2] Isamu Hosono 외, "Suppression and Measurement of ARC Furnace Flicker with Large Static Var Compensator", IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, Vol.PAS-98 No.6, pp.2276-2278, 1979
- [3] EMTP 국내위원회, "EMTP 강좌", 기초전력공학 공동연구소, pp.135-147, 1996