

## A Study on TCR Control Strategy in Hot Rolled Mill at POSCO

李汪夏\* · 朴基遠\*\* · 朴炳柱\*\*\* · 金德奎§  
(Wang-Ha Lee, Ki-Won Park, Byeong-Joo Park, Duk-Gyoo Kim)

**Abstract** - The control method of Thyristor Controlled Reactor(TCR) is described in this paper for compensating the poor power factor, unbalanced and/or nonlinear load. Also, auxiliary controller such as DC current and power-factor controller is described. The reference current of TCR is calculated from the active and reactive current components for each of the positive and negative sequence components in the load currents. This reactive power control technique was verified by simulation program and will be used in 5Mvar TCR system, which will be installed next year at hot rolled mill at POSCO, located in Kwang-Yang .

**Key Words** : TCR, SVC, 무효전력제어, 전압변동, TCR용 FC

### 1. 서론

3상 배전계통에서의 DC 아크로 및 대형압연기와 같은 산업용 부하들은 순시적으로 급변하는 무효전력량을 요구하며, 경우에 따라서는 불평형에 의한 역상분 전류를 발생하기도 한다.

PCC(Point of Common Coupling)에서의 급격한 무효전력 변동은 전압프리카로 이어져 부하의 오동작을 유발하거나 수명을 단축시킬 수 있다. 또한, 불평형에 의한 역상분 전류는 송전선로 및 변압기에서의 손실을 증가시키며 이로 인한 역상분 전압은 정류기 DC단의 전압맥동 및 전동기 부하의 손실을 증가시킨다.

이에 대한 해결방안으로서 정지형 무효전력보상기(Static Var Compensator : SVC)를 대표하는 사이리스터 제어 리액터(Thyristor Controlled Reactor : TCR)는 반주기 단위의 빠른 응답특성, 제어의 연속성 및 경제성을 장점으로 하여 전 세계적으로 가장 널리 사용되어왔다. 현재 고조파와 무효전력을 동시에 보상할 수 있는 STATCOM(STATIC COMPensator)과 같은 발전된 정지형 무효전력보상기(Advanced Static Var Compensator : ASVC)가 상용화를 목전에 두고 있으나 향후 몇 년간은 신뢰성을 인정받은 TCR 시스템이 무효전력 보상기의 주류를 이룰 것으로 보인다[1,4].

이에 본 연구는 TCR 시스템의 국산화를 목표로 하여 매우 빠른 무효전력 보상특성을 갖음과 동시에 부하 불평형의 영향을 최소화할 수 있는 제어방안을 제시한다. 제어알고리즘은 33Kvar TCR 축소모델에 의해 실험되었다[5] 광양에 위치

한 광양 제철소 열연공장 정정라인의 5MW 부하에 대하여 부하특성을 확인하고, TCR용 FC를 설계하여 우선 적용하고, 차기 과제로 TCR이 제작되어 전체 SVC(FC+TCR) 시스템이 적용될 예정으로써 본 논문에서는 1차년도에 제작된 FC(Fixed Capacitor)를 설계하고, 시뮬레이션한 것을 보고한다.

### 2. 본론

#### 2.1 시스템 구성도

FC(Fixed Capacitor)/TCR은 그림 1에서와 같이 TCR을 커패시터 बैं크와 함께 사용한 경우를 말한다. Δ-결선 TCR은 3고조파의 모션 유입을 억제한다. 또한, Y-결선 수동필터는 접지시킬 경우, 지락 보호계전기의 오동작을 유발하여 주전원 개폐기를 동작시킬 우려가 있으며, 또한 역상분 전류에 대한 폐회로를 제공하여 수동필터부의 불평형 보호계전기를 동작시킬 수 있기 때문에 일반적으로 비접지 방식을 채택하고 있다.

전력회로 구성도

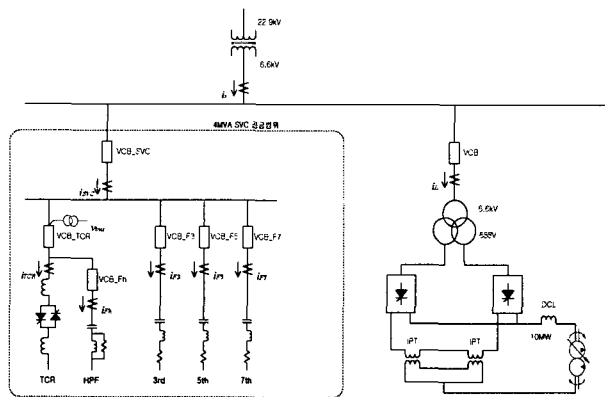


그림 1 FC/TCR 시스템의 구성도  
Fig. 1 Basic configuration of the TCR/FC

\* 正會員 : 浦港産業科學硏究員 책임硏究員  
\*\* 正會員 : 포스콘 技術硏究所 선임硏究員  
\*\*\* 正會員 : PQ tech 대표이사  
§ 正會員 : 경북대학교 전기전자공학과 교수  
接受日字 : 2003年 6月 2日  
最終完了 : 2003年 8月 18日

고조파 필터의 차수 조합은 부하 특성에 따라 달라진다. DC 아크로 부하일 경우 그림 1과 같이 흡수 차수의 필터를 설치하는 것이 일반적이며, 특히 3차 필터는 불평형 제어시 발생하는 TCR의 3차 고조파를 흡수할 수 있도록 용량을 고려하여야 한다. 산업용 부하는 주로 지상으로 운전되기 때문에 FC/TCR의 운전영역은 대개 진상 영역으로 국한된다. 따라서, 고조파 필터의 커패시터 총용량은 부하가 요구하는 최대 무효전력량에 상응하여 설계되어지며, 각 차수 필터는 전원 임피던스와의 병렬공진을 피할 수 있도록 한다. TCR 리액터의 인덕턴스 용량은 사이리스터 최대 도통각의 80%점에서 FC/TCR의 출력이 제로가 되도록 설계한다.

2.2 보상 전류의 검출

임의의 3상 전류는 기본과 성분과 고조파 성분으로 나눌 수 있고 기본파성분을 다시 정상분, 역상분, 영상분으로 나눌 수 있다. FC/TCR이 만들어야 하는 보상전류는 정상분과 역상분의 무효전류성분으로 구성되며, 각각을 추출하기 위하여 d-q 동기 회전좌표계를 이용한다.

$$P(\theta) = \frac{2}{3} \begin{bmatrix} \cos\theta & \cos(\theta-\gamma) & \cos(\theta+\gamma) \\ \sin\theta & \sin(\theta-\gamma) & \sin(\theta+\gamma) \end{bmatrix}, \quad \gamma = \frac{2}{3}\pi$$
 와같이 정의하면, q 기준 동기회전좌표계상의 부하전류는 식 (1)과 같이 표현된다.

$$\begin{bmatrix} i_{ide}^{(1)} & i_{iqe}^{(1)} \end{bmatrix}^T = P(\theta) \cdot \begin{bmatrix} i_{ia} & i_{ib} & i_{ic} \end{bmatrix}^T \quad (1)$$

$$\begin{bmatrix} i_{ide\_dc}^{(1)} & i_{iqe\_dc}^{(1)} \end{bmatrix}^T = LPF \left( \begin{bmatrix} i_{ide}^{(1)} & i_{iqe}^{(1)} \end{bmatrix}^T \right) \quad (2)$$

θ 기준 동기회전좌표계상에서 정상분은 dc, 역상분은 120Hz 성분으로 나타나므로, (2)식와 같이 저역통과필터(LPF)를 적용하면  $i_{ide\_dc}^{(1)}$  및  $i_{iqe\_dc}^{(1)}$ 는 각각 정상분전압에 대한 부하전류의 유효 및 무효 성분을 반영한다.

그림 2의 제어 블록도에서 Is는 전원측 전류(SVC설치 노드로 유입되는 방향의 전류), Psx는 x상의 유효전력, Qsx는 x상의 무효전력, PFref는 유저가 설정한 power factor 레퍼런스로 정의한다

-θ 기준 동기회전좌표계상에서 부하전류는 식 (3)과 같이 표현되며, 정상분은 120Hz, 역상분은 dc성분으로 나타나므로, 식 (4)와 같이 LPF를 적용하면 역상성분을 얻을 수 있다.

$$\begin{bmatrix} i_{ide}^{(2)} & i_{iqe}^{(2)} \end{bmatrix}^T = P(-\theta) \cdot \begin{bmatrix} i_{ia} & i_{ib} & i_{ic} \end{bmatrix}^T \quad (3)$$

$$\begin{bmatrix} i_{ide\_dc}^{(2)} & i_{iqe\_dc}^{(2)} \end{bmatrix}^T = LPF \left( \begin{bmatrix} i_{ide}^{(2)} & i_{iqe}^{(2)} \end{bmatrix}^T \right) \quad (4)$$

그러나,  $i_{ide\_dc}^{(2)}$ 와  $i_{iqe\_dc}^{(2)}$ 는 각각 역상분 전압에 대한 부하전류의 유효·무효 성분이므로, 정상분 전압에 대한 유효·무효전류성분으로의 변환과정이 필요하다. 이를 위하여, 그림 3은  $i_{ide\_dc}^{(2)}$ 와  $i_{iqe\_dc}^{(2)}$ 를 3상 정지좌표계상에 표현하였다.

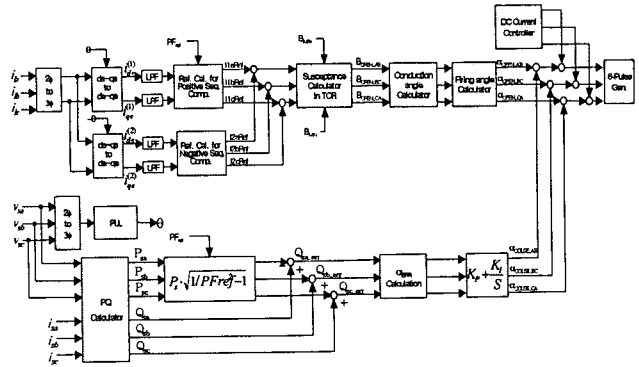


그림 2 제어 블록도  
Fig. 2 Control Block Diagram

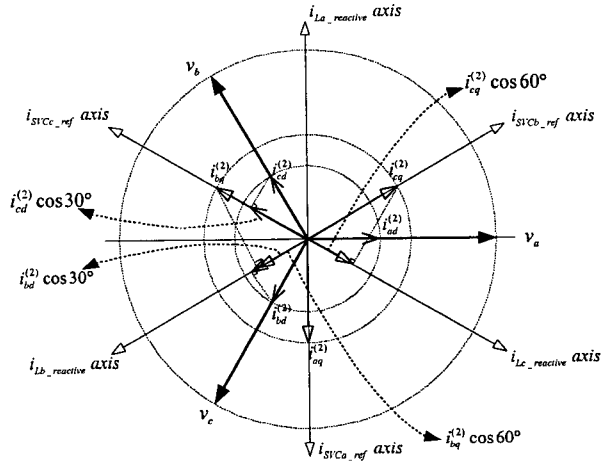


그림 3 역상분 무효전류 추출  
Fig. 3 Negative-sequence reactive current Vector Diagram

$i_{iq\_dc}^{(2)}$  및  $i_{id\_dc}^{(2)}$ 를 3상 좌표축에 옮기면, 각각  $(i_{aq}^{(2)}, i_{bd}^{(2)})$  및  $(i_{ad}^{(2)}, i_{bd}^{(2)}, i_{cd}^{(2)})$ 으로 표현된다. 정상분 전압에 대한 a상에서의 역상무효전류는  $i_{aq}^{(2)}$  및  $i_{ad}^{(2)}$ 의  $iLa\_reactive$  축으로의 사영의 합으로 표현되며, b상 및 c상에 대해서도 동일한 방식이 적용된다. 따라서, 각 상에서의 무효전류는 다음 식으로 표현 가능하다.

$$\begin{aligned} i_{La\_reactive}^{(2)} &= i_{ad}^{(2)} \times \cos(90^\circ) - i_{aq}^{(2)} \times \cos(0^\circ) \\ i_{Lb\_reactive}^{(2)} &= i_{bd}^{(2)} \times \cos(30^\circ) + i_{bq}^{(2)} \times \cos(60^\circ) \\ i_{Lc\_reactive}^{(2)} &= -i_{cd}^{(2)} \times \cos(30^\circ) + i_{cq}^{(2)} \times \cos(60^\circ) \end{aligned} \quad (5)$$

동일한 절차를 통하여, 식 (6)과 같이 역상분 유효전류를 얻을 수 있다.

$$\begin{aligned} i_{La\_active}^{(2)} &= i_{ad}^{(2)} \cos 90^\circ + i_{aq}^{(2)} \cos 0^\circ \\ i_{Lb\_active}^{(2)} &= -i_{bd}^{(2)} \cos 60^\circ - i_{bq}^{(2)} \cos 30^\circ \\ i_{Lc\_active}^{(2)} &= -i_{cd}^{(2)} \cos 60^\circ + i_{cq}^{(2)} \cos 30^\circ \end{aligned} \quad (6)$$

FC/TCR의 기준전류의 크기는 부하전류의 정상분 유효·무효전류와 역상분 무효전류로부터 얻어진다. 이때, 정상분에 대한 RMS 보상전류(I<sub>SVC\_RMS(1)</sub>)는 역률기준치를 고려하면 식 (7)과 같으므로,

$$I_{SVC\_RMS(1)} = \frac{1}{\sqrt{3}} (i_{lq}^{(1)} - i_{ld}^{(1)} \cdot \tan(\cos^{-1} PF_{ref})) \quad (7)$$

보상범위내에서의 FC/TCR의 기준전류는 식 (8)과 같다.

$$\begin{aligned} I_{SVC\_a\_RMS} &= I_{SVC\_RMS(1)} + \frac{1}{\sqrt{3}} i_{la\_reactive}^{(2)} \\ I_{SVC\_b\_RMS} &= I_{SVC\_RMS(1)} + \frac{1}{\sqrt{3}} i_{lb\_reactive}^{(2)} \\ I_{SVC\_c\_RMS} &= I_{SVC\_RMS(1)} + \frac{1}{\sqrt{3}} i_{lc\_reactive}^{(2)} \end{aligned} \quad (8)$$

### 2.3 개루프 제어기

#### 2.3.1 서셉턴스 계산

FC/TCR은 일종의 가변 서셉턴스 장치이므로 싸이리스터 점화각을 조정하면 식 (8)에서 얻은 기준전류를 선로에 주입할 수 있다. 우선 FC/TCR을 Y-결선 서셉턴스라고 가정하면, 각 상의 서셉턴스는 식 (9)와 같다.

$$B_{SVC\_a} = \frac{I_{SVC\_a\_RMS}}{V_{a\_RMS}}, B_{SVC\_b} = \frac{I_{SVC\_b\_RMS}}{V_{b\_RMS}}, B_{SVC\_c} = \frac{I_{SVC\_c\_RMS}}{V_{c\_RMS}} \quad (9)$$

TCR의 서셉턴스(B<sub>TCR</sub>)을 구하기 위해 식 (9)에서 커패시터 뱅크의 서셉턴스(B<sub>FILTER</sub>)를 제거하면,

$$\begin{aligned} B_{TCR\_a} &= B_{SVC\_a} - B_{FILTER\_a} \\ B_{TCR\_b} &= B_{SVC\_b} - B_{FILTER\_b} \\ B_{TCR\_c} &= B_{SVC\_c} - B_{FILTER\_c} \end{aligned} \quad (10)$$

식 (10)의 결과는 Y-결선된 TCR 서셉턴스이므로 Y-Δ어드미턴스 변환식을 적용하면 식 (11)과 같이 Δ-결선 TCR의 서셉턴스를 구할 수 있다.

$$\begin{aligned} B_{TCR\_ab} &= \frac{B_{TCR\_a} \cdot B_{TCR\_b}}{B_{TCR\_a} + B_{TCR\_b} + B_{TCR\_c}} \\ B_{TCR\_bc} &= \frac{B_{TCR\_b} \cdot B_{TCR\_c}}{B_{TCR\_a} + B_{TCR\_b} + B_{TCR\_c}} \\ B_{TCR\_ca} &= \frac{B_{TCR\_c} \cdot B_{TCR\_a}}{B_{TCR\_a} + B_{TCR\_b} + B_{TCR\_c}} \end{aligned} \quad (11)$$

#### 2.3.2 도통각 계산

도통각 계산부는 TCR의 각 상의 서셉턴스가 식 (11)에서 얻은 값과 같도록 할 수 있는 도통각을 계산하는 부분이다. 도통각에 대한 TCR의 전류는 식 (12)와 같다.

$$i = \begin{cases} \frac{\sqrt{2}V}{X_L} (\cos\alpha - \cos\alpha\omega) & : \alpha < \alpha\omega < \alpha + \sigma \\ 0 & : \alpha + \sigma < \alpha\omega < \alpha + \pi \end{cases} \quad (12)$$

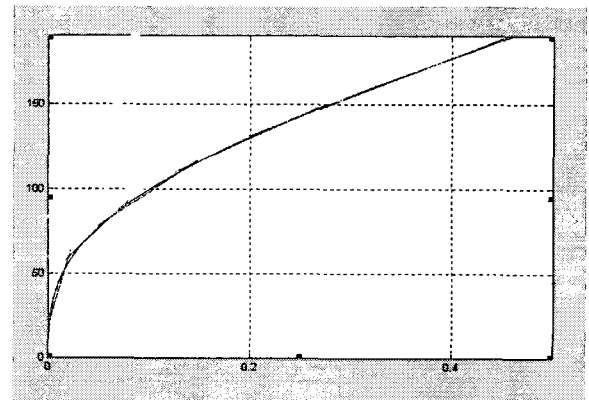
푸리에 분석을 통해, 전류의 기본파성분만을 구하여, 서셉턴스를 구하면 식 (13)과 같다.

$$B_L(\sigma) = \frac{\sigma - \sin\sigma}{\pi X_L} \quad (13)$$

식 (13)을 서셉턴스에 대한 함수로 만들기 위해, 사인 함수를 테일러 급수로 3차항까지 전개하면  $\sigma = (6\pi X_L B_L)^{1/3}$ 이 얻어진다. 그러나, 결과식은 DSP의 연산시간을 증가시킬 뿐만 아니라 정확도가 떨어지기 때문에, 본 제어기에서는 서셉턴스 구간별로  $\sigma$ 를 선형화하는 방식을 이용하였다. 점호각은  $\alpha = \pi - \sigma/2$  관계에 의하여 얻을 수 있다. 서셉턴스로부터 도통각을 구하기 위해, 도통각을 서셉턴스에 대하여 정리하기 위한 방법으로,  $\sin\sigma$ 를 테일러 급수로 2차까지만 전개한 근사식을 사용할 경우,

$\sigma = \left(\frac{\pi X_L B_L}{6}\right)^{1/3}$ 와 같은 관계식을 얻을 수 있다.

그러나, 이 관계식을 사용할 경우, 많은 연산시간이 요구될 뿐만 아니라, 서셉턴스가 작을 경우의 오차가 상당히 커지는 경향이 있다. 그래서 서셉턴스 영역별로 1차 함수로 근사하여 사용하였다.



서셉턴에 대한(x축) 도통각(y축)의 변이 곡선

$\sigma = f(B_{ref})$ 를 선형화하여 근사한다.

- if( 0 < B<sub>ref</sub> < 0.02 )  $\sigma = B_{ref} * 34.8 + 0.348$
- if( 0.02 <= B<sub>ref</sub> < 0.06 )  $\sigma = B_{ref} * 10 + 0.844$
- if( 0.06 <= B<sub>ref</sub> < 0.14 )  $\sigma = B_{ref} * 6.825 + 1.0345$
- if( 0.14 <= B<sub>ref</sub> < 0.24 )  $\sigma = B_{ref} * 4.6 + 1.3466$
- if( 0.24 <= B<sub>ref</sub> < 0.38 )  $\sigma = B_{ref} * 4 + 1.49$

### 2.4 페루프 제어기

#### 2.4.1 무효전력제어기

무효전력제어기는 모선 무효전력을 조정하여 역률을 제어한다. 그림 2의 PQ calculator는 각 상을 단상으로 고려하여 모선의 유효·무효전력을 계산한다. 계산된 결과를 식 (14)에 대입하면 각 상의 무효전력 오차(Q<sub>err</sub>)를 얻는다.

$$Q_{err} = Q_{ref} - Q_{bus} = P \cdot \sqrt{1/ PF_{ref}^2 - 1} - Q_{bus} \quad (14)$$

그림 4는 모선에 대해  $Q_{err}$ 만큼을 더 보상하기 위해  $\Delta$ -결선 TCR을 추가한 경우를 나타내었다. 두 대의 TCR은 서로 병렬 연결이므로, 다시 한 대의 TCR로 표현될 수 있으며, 이것의 서셉턴스는 두 TCR 서셉턴스의 합과 같다. 그러므로, ( $Q_{err\_a}$ ,  $Q_{err\_b}$ ,  $Q_{err\_c}$ )를 유입할 수 있는 ( $B_{err\_ab}$ ,  $B_{err\_bc}$ ,  $B_{err\_ca}$ )를 계산하여 식 (11)에서 얻은 개루프 제어기의 TCR 서셉턴스 기준치에 더해주면 무효전력 오차 보정이 가능해짐을 알 수 있다.

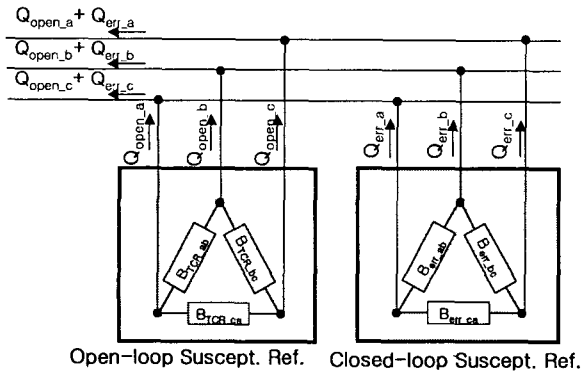


그림 4 페루프 제어기 개념도  
Fig. 4 Schematic of Closed loop Controller

Y-결선 TCR일때의 서셉턴스 오차( $B_{err}$ )는 식 (15)와 같으므로, Y- $\Delta$  어드미턴스 변환식을 적용하면 식 (16)과 같은  $\Delta$ 결선에 대한 서셉턴스를 얻을 수 있다.

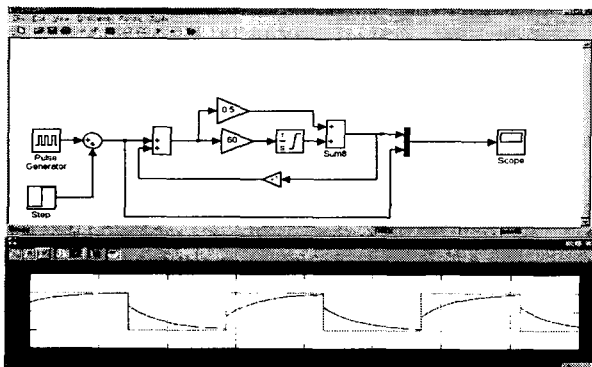
$$B_{err\_a} = \frac{Q_{err\_a}}{V_a^2}, \quad B_{err\_b} = \frac{Q_{err\_b}}{V_b^2}, \quad B_{err\_c} = \frac{Q_{err\_c}}{V_c^2} \quad (15)$$

$$B_{err\_ab} = \frac{B_{err\_a} \cdot B_{err\_b}}{B_{err\_a} + B_{err\_b} + B_{err\_c}}$$

$$B_{err\_bc} = \frac{B_{err\_b} \cdot B_{err\_c}}{B_{err\_a} + B_{err\_b} + B_{err\_c}}$$

$$B_{err\_ca} = \frac{B_{TCR\_c} \cdot B_{TCR\_a}}{B_{err\_a} + B_{err\_b} + B_{err\_c}} \quad (16)$$

식 (16)에서 얻어진 서셉턴스값은 제어의 안정성을 위해 PI제어기를 통해 개루프 제어기의 도통각 기준치에 느리게 반영된다. 사용한 PI 제어기를 다음 그림에 표시하였다.



2.4.2 DC 제어기

직류성분은 주로 변압기의 반주기 포화현상 또는 TCR 역병렬 연결 사이리스터의 순방향 전압강하 불평형에 의하여 발생한다[2]. 그림 5의 a)는 입력변압기의 a상에 반주기 포화가 발생한 경우의 DC분에 대한 등가회로이고, 그림 b)는 TCR의 ca상 직렬 사이리스터에서 전압 불균형이 발생한 경우에 대한 등가회로이다. 그림에서  $R_S$  및  $R_{TCR}$ 은 매우 작은 값이기 때문에 0.1V의 전압 오프셋에 대하여 수십~수백 Ampere의 직류전류를 발생시킬수 있게 된다. 그러나, 실제 회로가 아래 등가회로와 같아지기 위해서는 시상수에 의해 수십초에서 수분까지의 시간이 필요하므로, 이를 방지하기 위한 제어기 및 보호회로가 요구된다.

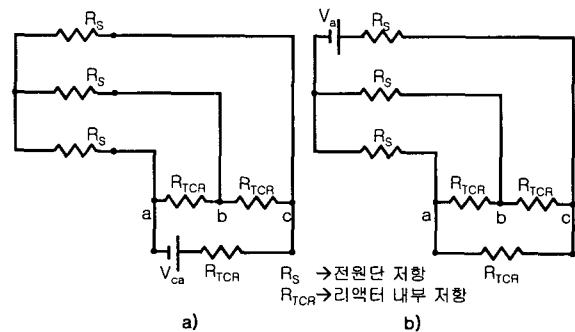


그림 5 DC 등가회로  
Fig. 5 Equivalent Circuit in DC

전압 오프셋의 영향은 FC/TCR에 있어 리액터에만 나타난다. 따라서 TCR 상전류 제어를 통해 그 영향을 최소화 할수 있다. 즉, TCR 상전류는 양의 영역과 음의 영역에 대해 그림 6과 같이 게이팅각을 서로 달리 하면 오프셋 전류를 상쇄시킬 수 있다.[6]

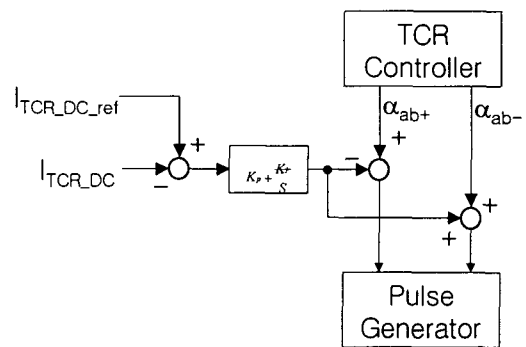


그림 6 DC 제어기 구조  
Fig. 6 DC Controller Block

2.5 시뮬레이션

표 1, 2와 같은 조건하에 시뮬레이션 프로그램을 이용하여 부하에 따라서 harmonic filter 존재 여부에 따라  $V_{thd}(V$

threshold) 감소 효과를 확인할 수 있었다. 그림 7a,b 는 그때의 실험 근거 데이터와 회로도로서, FE01지점에서 여러가지 전압, 전류, 역률을 측정된 값을 첨부하였으며, 이때 역률을 개선하기 위해서 FE01 지점에 어느정도의 수동 필터를 달면 0.90 이상의 역률을 얻을 수 있는지를 컴퓨터로 시뮬레이션하는 것입니다. 그림 7c는 harmonic filter를 사용한 경우이며, 그림에서 7d는 harmonic filter를 사용하지 않은 경우로서 효과를 확인할 수 있다.

표 1 측정 데이터 요약

Table 1 Measured data

NO	DATA구분	부하전력		
		유효전력 [kW]	피상전력 [kVA]	무효전력 [kVAR]
1		2261	5488	4971

표 2 시뮬레이션 조건

Table 2 Simulation condition

선전압	6.9KV	SVC정격	33kVAr
3상 R-L	4kW, PF=0.4	PCR(위상제어 정류기)	500W, PF=0.1
단상 R	4.8kW, 40[Ω]	입력변압기	100kVA, X=8%

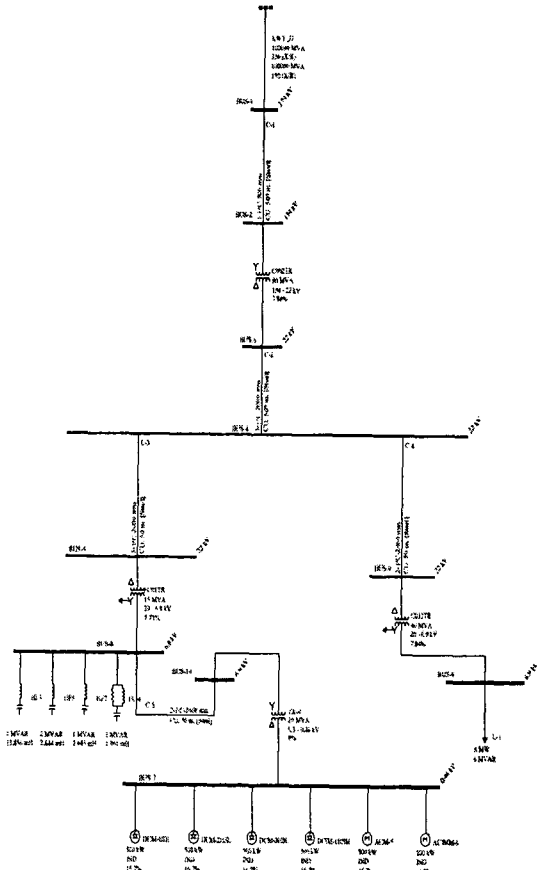


그림 7b 시스템 설계 회로도  
Fig. 7b System configuration

POSCO FF01 Apr 03 2002 (Tue)		Voltage THD:	
BNI SUMMARY 4:46:38 PM		A	0.8 2.4 4.3 %
FROM: 4:29 PM Apr 03 2002 (Tue)		B	1.3 2.6 4.1 %
To: 4:44 PM Apr 03 2002 (Tue)		C	0.9 2.4 4.4 %
		TOTAL	1.0 2.5 4.2 %
Demand:		Current THD:	
Phase	Average Unit	A	1.0 3.0 7.0 %
TOTAL	2.261 MW PF	B	1.2 3.7 7.9 %
TOTAL	0.42	C	1.2 3.9 8.0 %
		TOTAL	1.2 3.8 7.8 %
Power Consumption:		Derate transformer to:	
Phase	Accumulated Unit	TOTAL	95.6 97.9 99.5 %
TOTAL	566.6 kWh	(Eddy current loss set to: 10.0%)	
TOTAL	1.232 MVAh		
TOTAL	1.350		
Phase	Min Avg Max Unit	I*V Product:	
Voltage:		A	22.9 54.0 99.5 k
A-B	6.726 6.830 6.956 kV	B	28.5 57.9 99.3 k
B-C	6.744 6.851 6.976 kV	C	23.3 57.0 102.0 k
C-A	6.809 6.917 7.041 kV	TOTAL	24.7 55.6 95.0 k
TOTAL	6.799 6.866 6.991 kV	3rd Harmonic Amps:	
Unb	0.7 0.7 0.8 %	A	0.6 0.9 %
		B	0.5 1.3 %
Current:		C	0.3 0.8 1.2 %
A	313 450 600 A	TOTAL	0.4 0.9 1.0 %
B	299 448 583 A	5th Harmonic Amps:	
C	331 479 632 A	A	0.4 3.1 6.0 %
TOTAL	0.345 0.800 1.065 kA	B	0.0 2.0 5.7 %
Unb	2.9 3.0 3.4 %	C	0.2 3.1 6.2 %
		TOTAL	0.3 3.0 5.9 %
Power:		7th Harmonic Amps:	
TOTAL	1.722 2.261 3.002 MW	A	0.0 1.0 3.2 %
		B	0.0 1.1 3.3 %
Volt-Amps:		C	0.0 1.1 3.3 %
TOTAL	3.008 5.488 7.197 MVA	TOTAL	0.1 1.1 3.3 %
VA Reactive:		11th Harmonic Amps:	
TOTAL	3.319 4.971 6.460 MVAR	A	0.0 0.9 2.7 %
		B	0.0 0.9 2.6 %
Power Factor:		C	0.0 0.9 2.9 %
TOTAL	0.29 0.42 0.58 PF	TOTAL	0.1 0.9 2.7 %
Displacement Factor:		Capacity (12.00MVA):	
TOTAL	0.30 0.42 0.59 dPF	TOTAL	31.7 45.7 60.0 %
Current Leads:		Cost/Hours:	
A	-74.1 -57.0 -57.0	TOTAL	103.3 135.6 180.1 \$/hr
B	-72.1 -54.4 -54.0	Frequency:	
C	-71.8 -54.2 -53.9	TOTAL	60.0 60.0 60.1 Hz
Voltage Sequence:			
Pos	100.0 100.0 100.0 %		
Zero	0.6 0.6 0.7 %		
Neg	0.3 0.4 0.4 %		
Current Sequence:			
Pos	99.9 99.9 100.0 %		
Zero	0.1 0.1 0.1 %		
Neg	2.4 3.6 5.6 %		

그림 7a 측정 데이터  
Fig. 7a Measured data

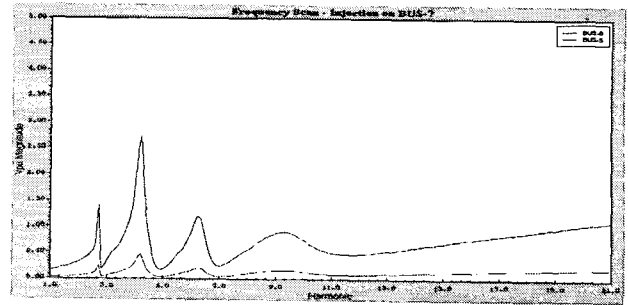


그림 7c 하모닉 필터 설치경우  
Fig 7c With Harmonic Filter

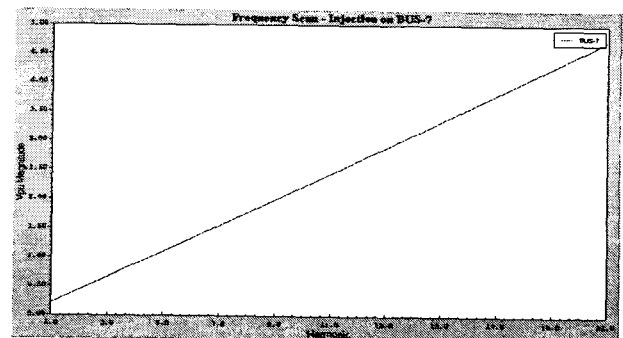


그림 7d 하모닉 필터 없을 경우  
Fig. 7d Without Harmonic Filter

상기 시뮬레이션 결과 및 현장에서 측정한 BMI(전력분석 장치명) 장비를 통한 현장에서의 변동부하로 인한 무효전력의 발생량을 측정한 결과를 바탕으로 TCR에 사용할 FC를 우선 설계하였다.

2.6 시스템 설계 사양

POSCO FFBI Apr 03 2002 (Tue)  
 BMI SUMMARY 3:44:02 PM  
 FROM: 3:38 PM Apr 03 2002 (Tue)  
 To: 3:44 PM Apr 03 2002 (Tue)

Demand Phase	Average	Unit
TOTAL	1,876	MW
TOTAL	8.45	PF

Power Consumption:

Phase	Accumulated	Unit
TOTAL	448.4	kWh
TOTAL	872.2	kVAh
TOTAL	973.9	kWh

Phase	Min	Avg	Max	Unit
Voltage:				
A	6.272	6.847	6.948	kV
B	6.743	6.878	6.923	kV
C	6.884	6.938	7.033	kV
TOTAL	6.757	6.881	6.984	kV
Unb	8.6	8.7	8.8	%
Current:				
A	287	356	494	A
B	267	341	483	A
C	267	371	512	A
TOTAL	436	519	688	A
Unb	3.1	4.5	7.0	%
Power:				
TOTAL	1.475	1.876	2.425	MW
Volt-Demst:				
TOTAL	3.826	4.239	5.812	MVA
VR Reactive:				
TOTAL	2.481	3.777	5.378	MVAR
Power Factor:				
TOTAL	0.84	0.45	0.57	PF
Displacement Factor:				
TOTAL	0.28	0.46	0.59	DPF
Current Leads:				
A	-71.4	-65.7	-59.1	°
B	-69.1	-62.1	-53.5	°
C	-68.3	-61.4	-53.5	°
Voltage Sequence:				
Pos	100.0	100.0	100.0	%
Zero	0.0	0.0	0.0	%
Neg	0.0	0.0	0.0	%
Current Sequence:				
Pos	99.9	100.0	%	
Zero	0.0	0.0	%	
Neg	2.9	4.8	7.2	%

그림 8 BMI 측정 data  
 Fig. 8 BMI Measured data

표 3 FC 설계 제작 사양  
 Table 3 FC Specification

차수	3th	5th	7th	11th
정격전압(V)	4484	4150	4070	4020
정격전류(A)	41.8	41.8	41.8	41.9
용량(mF)	24.75	26.74	27.29	27.63
주파수(Hz)	180	300	420	660

그림 8은 광양 열연공장에서의 실측한 BMI(전력분석 장치명) data로써 그것을 바탕으로 필터량은 경제성을 고려하여 5MVA 급으로 하였으며, 각 차수별 필터용량은 고조차 분석 결과를 바탕으로 상대적으로 고조파 성분이 큰 5차에 2MVA 정도로 배분하고, 3,7,11차는 1MVA급을 배분하여 정격전압에 따라서 정전용량을 표 2와같이 결정하였다. 향후 2차년도에 설계할 TCR의 리액 리액터 및 제어기를 제작하여 전체 시스템으로 완성할 예정이다. 사진1은 제작된 수동필터로써 현재 연구소에 분해 보관중이다.

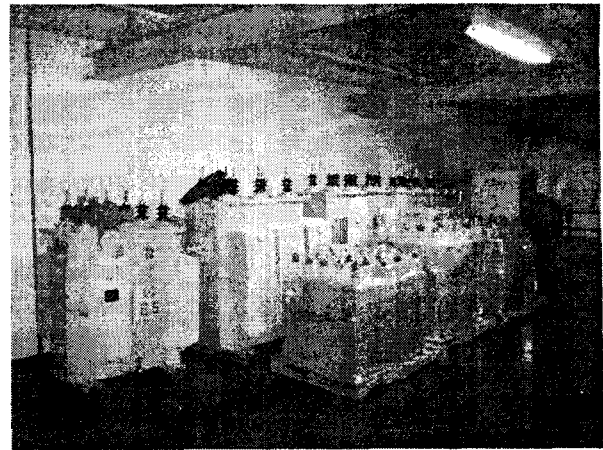


사진 1 수동 필터  
 Photo 1 FC

앞에서 언급한 바와 같이 5차 고조파서 성분이 우세하여 2MVA정도를 할당하고 각 필터의 용량은 표 3에 표시 하였습니다.

3차, 7, 고차필터는 각각 6개로 구성되어 있으며, 5차는 12개로 구성되어 있습니다. 그래서 총 5MVA 급이 되도록 하였습니다. 측정결과를 바탕으로 각 차수별 하기와 같은 공식에 따라 적용하면 기본파에 대한 필터의 임피던스 표현은 다음과 (17)같이 되고,

$$\begin{aligned}
 X_L &= \omega L = 2\pi fL \\
 X_C &= \frac{1}{\omega C} = \frac{1}{2\pi fC}
 \end{aligned}
 \tag{17}$$

n 차고조파에 대한 필터의 임피던스는 (18)로 표시됩니다.

$$X_{L,n} = n \cdot X_L, \quad X_{C,n} = \frac{X_C}{n}
 \tag{18}$$

n 차고조파의 공진조건은 L과 C의 임피던스가 다음과 같은 관계를 가질 때 공진한다.

$$n \cdot X_L = \frac{X_C}{n}, \quad X_L = \frac{X_C}{n^2}, \quad X_C = n^2 \cdot X_L$$

$X_L$  만으로 표현하는 필터의 임피던스는 식 (19)로 표현되며

$$Z_{f,L} = |X_L - X_C| = n^2 X_L - X_L = (n^2 - 1) X_L = (n^2 - 1) \omega L
 \tag{19}$$

$X_C$  로 표현한 필터의 임피던스는 식 (20)로 되어서

$$Z_{f,C} = |X_L - X_C| = X_C - \frac{X_C}{n^2} = \left(\frac{n^2 - 1}{n^2}\right) X_C = \left(\frac{n^2 - 1}{n^2}\right) \cdot \frac{1}{\omega C}
 \tag{20}$$

튜닝리액터와 캐패시터 값은 최종적으로 (20)과 (21)로 표현되며 이를 근거로 사양설계를 하였습니다.

$$Q_f = \frac{V^2}{Z_{f,L}} = \frac{V^2}{(n^2 - 1)\omega L}$$

$$L = \frac{1}{\omega} \cdot \frac{1}{n^2 - 1} \cdot \frac{V^2}{Q} \quad (21)$$

캐퍼시터의 설계식

$$Q_f = \frac{V^2}{Z_{f,C}} = \frac{V^2}{\frac{(n^2 - 1)}{n^2 \cdot \omega C}} = \frac{n^2 \cdot \omega C V^2}{(n^2 - 1)}$$

$$C = \frac{1}{\omega} \cdot \frac{n^2 - 1}{n^2} \cdot \frac{Q}{V^2} \quad (22)$$

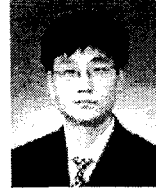
### 3. 결 론

본 논문에서는 무효전력 보상 장치중 현 시점에서의 수요가 가장 많은 FC/TCR방식의 SVC를 5MVA급 부하에 적용하기 위한 제어 알고리즘 및 수동 필터 설계 및 제작을 간략히 시뮬레이션하고 제작하였다. 향후 리액터 설계를 통하여 전체 시스템 완성시 국내 최초로 제작한 무효전력 제어용 TCR의 제작하는 기술확보 및 향후 STATCOM 제작시에도 무효전력제어 알고리즘 응용기술, 무효전력 유효전력 검출 기법 및 제어기 설계기술은 활용할 수 있으며 수 MVA급 이상의 수요 대응할 수 있는 기술을 확보했다. 물론 전체의 안정적인 운영결과는 2차년도를 통하여 TCR을 현장 적용후에나 입증할 수 있으며 TCR 설치후 안정적인 운용에관한 상세보고와 소규모 축소모형에 대한 실험 연구결과는 차후에 보고할 예정이다.

### 참 고 문 헌

- [1] Arindam Ghosh, "A New Approach to Load Balancing and Power Factor Correction in Power Distribution System", IEEE Transactions on Power Delivery, VOL. 15, pp 417~422, 2000.
- [2] Y. Mansour "Harmonics from SVC Transformer Saturation with Direct Current Offset", IEEE Transactions on Power Delivery, VOL. 9, No. 3, pp 1502~1508, 1502.
- [3] T. J. E. Miller, Ed., "Reactive Power Control in Electric Systems, New York: John Wiley, 1982.
- [4] Shih-Min Hsu, "Discussion of Using a Static Var Compensator to Balance a Distribution System", IEEE Transactions on Industry Applications, Vol. 35, No 5, 1999.
- [5] Chang-Joo Park, Ki-Won Park, "A study on TCR control strategy in Unbalanced Load" 대한전기학회 하계학술 대회 2001년
- [6] "control system description for POSCO SVC", 1995, PPK=SSE-91.4500-9000/FBS001,20/23 pages.

## 저 자 소 개



### 이 왕 하(李 汪 夏)

1964년 3월 24일생. 1987년 경북대 전자공학과 졸업. 1991년 동 대학원 전자공학과 졸업(석사). 1996년 동 대학원 수료(박사). 1991년~현재 동 포항산업과학 연구원 책임연구원

Tel : 054-279-6737

E-mail : wangha@rist.re.kr



### 박 기 원(朴 基 遠)

1967년 6월 4일생. 1992년 광운대학교 전기공학과 졸업(학사). 1994년 동 대학원 졸업(석사). 1996년 동 대학원 수료(박사). 1994년~현재 (주)포스콘 기술 연구소 선임연구원.

Tel : 02-3290-4471

E-mail : kwpark@poscon.co.kr



### 박 병 주(朴 炳 柱)

1958년4월13일생. 1982년 부경대학교 전기공학과 졸업. 1995년 전기응용기술사. 성균관대학교 대학원 전기공학과 졸업(석사). 현재 동 대학원 전기공학과 박사과정. 1986~2000 삼화콘텐서공업(주)기술팀장. 현재 전력품질기술(주) 대표이사

Tel : 031-223-1670

E-mail : bjPark@pqtech.co.kr



### 김 덕 규(金 德 奎)

1973년 경북대학교 전자공학 졸업(학사). 1977년 동 대학원 졸업(석사). 1989년. 東京大學 전기공학과(공학박사). 1977-1980 경북공업전문대학, 전임강사. 1980-1994 경북대학교 전자공학과 전임강사, 조교수, 부교수. 1994 -현재 경북대학교 전자공학과 교수

Tel : 053-950-5525

E-mail : dgkim@ee.knu.ac.kr