

3상 불평형 부하를 고려한 TCR 제어기법에 관한 연구

박창주 박기원 최창호
(주)포스콘

A Study on TCR Control Strategy in Unbalanced Load

Chang-Joo Park Ki-Won Park Chang-Ho Choi
POSCON

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 Matlab Simulink and 33Kvar TCR simulator, and will be used in 4.3Mvar TCR system, which will be installed next year at R-Tech Co., located in Po-Hang.

1. 서 론

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

PCC에서의 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 전세계적으로 가장 널리 사용되어왔다. 현재 고조파와 무효전력을 동시에 보상할 수 있는 STATCOM 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 실험되었으며, 포항에 위치한 자원 리사이클링공장의 10MW DC 아크로 부하를 보상하기 위한 SVC(FC+TCR) 시스템에 적용될 예정이다.

2. 본 론

2.1 시스템 구성도

FC(Fixed Capacitor)/TCR은 그림 1에서와 같이 TCR을 커패시터 뱅크와 함께 사용한 경우를 말한다. △-결선 TCR은

3고조파의 모선 유입을 억제한다. 또한, Y-결선 수동필터는 접지시킬 경우, 지락 보호계전기의 오동작을 유발하여 주전원 개폐기를 동작시킬 우려가 있으며, 또한 영상분 전류에 대한 폐회로를 제공하여 수동필터부의 불평형 보호계전기를 동작시킬 수 있기 때문에 일반적으로 비접시 방식을 채택하고있다.

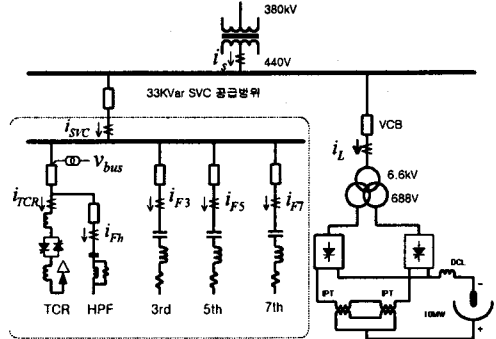


그림 1 시스템 구성도

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 기본파 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.

$$\begin{bmatrix} i_{ld}^{(0)} \\ i_{lq}^{(0)} \end{bmatrix} = P(\theta) \cdot \begin{bmatrix} i_{la} \\ i_{lb} \\ i_{lc} \end{bmatrix} \quad (1)$$

$$\begin{bmatrix} i_{ldc}^{(0)} \\ i_{lqc}^{(0)} \end{bmatrix} = LPF \left(\begin{bmatrix} i_{ld}^{(0)} \\ i_{lq}^{(0)} \end{bmatrix} \right) \quad (2)$$

θ 기준 동기회전좌표계상에서 정상분은 dc, 역상분은 120Hz 성분으로 나타나므로, (2)식와 같이 저역통과필터(LPF)를 적용하면 $i_{ldc}^{(0)}$ 및 $i_{lqc}^{(0)}$ 는 각각 정상분전압에 대한 부하전류의 유효 및 무효 성분을 반영한다.

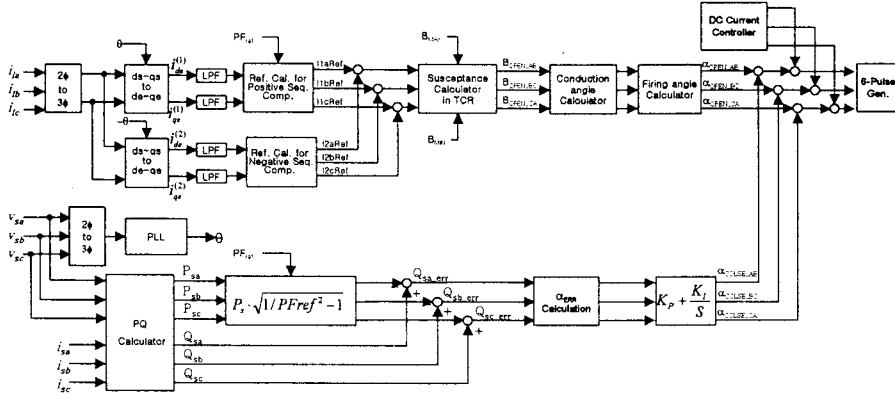


그림 2 제어 블럭도

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

$$\begin{bmatrix} i_{ld}^{(2)} \\ i_{lq}^{(2)} \end{bmatrix} = P(-\theta) \cdot \begin{bmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \end{bmatrix} \quad (3)$$

$$\begin{bmatrix} i_{ld_dc}^{(2)} \\ i_{lq_dc}^{(2)} \end{bmatrix} = LPF \left(\begin{bmatrix} i_{ld}^{(2)} \\ i_{lq}^{(2)} \end{bmatrix} \right) \quad (4)$$

그러나, $i_{ld_dc}^{(2)}$ 와 $i_{lq_dc}^{(2)}$ 는 각각 역상분 전압에 대한 부하전류의 유·무효 성분이므로, 정상분 전압에 대한 유·무효전류성분으로의 변환과정이 필요하다. 이를 위하여, 그림 2는 $i_{ld_dc}^{(2)}$ 와 $i_{lq_dc}^{(2)}$ 를 3상 정지좌표계상에 표현하였다.

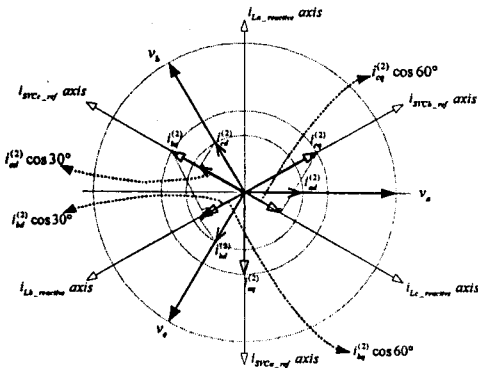


그림 3 역상분 무효전류 추출

$i_{ld_dc}^{(2)}$ 및 $i_{lq_dc}^{(2)}$ 를 3상 좌표축에 옮기면, 각각 $(i_{ld}^{(2)}, i_{lq}^{(2)})$ 및 $(i_{ad}^{(2)}, i_{aq}^{(2)})$ 으로 표현된다. 정상분 전압에 대한 a상에서의 역상무효전류는 $i_{ld}^{(2)}$ 및 $i_{lq}^{(2)}$ 의 $i_{La_reactive}$ 축으로의 사형의 합으로 표현되며, b상 및 c상에 대해서도 동일한 방식이 적용된다. 따라서, 각 상에서의 무효전류는 다음 식으로 표현 가능하다.

$$i_{la_reactive}^{(2)} = i_{ad}^{(2)} \times \cos(90^\circ) - i_{aq}^{(2)} \times \cos(0^\circ)$$

$$i_{lb_reactive}^{(2)} = i_{bd}^{(2)} \times \cos(30^\circ) + i_{bq}^{(2)} \times \cos(60^\circ)$$

$$i_{lc_reactive}^{(2)} = -i_{cd}^{(2)} \times \cos(30^\circ) + i_{cq}^{(2)} \times \cos(60^\circ)$$

(5)

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

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

FC/TCR의 기준전류의 크기는 부하전류의 정상분 유·무효전류와 역상분 무효전류로부터 얻어진다. 이때, 정상분에 대한 RMS 보상전류($I_{SVC_RMS(1)}$)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.

$$\begin{aligned} I_{SVC_a_RMS} &= I_{SVC_RMS(1)} + \frac{1}{\sqrt{3}} i_{ld_reactive}^{(2)} \\ I_{SVC_b_RMS} &= I_{SVC_RMS(1)} + \frac{1}{\sqrt{3}} i_{lb_reactive}^{(2)} \\ I_{SVC_c_RMS} &= I_{SVC_RMS(1)} + \frac{1}{\sqrt{3}} i_{lc_reactive}^{(2)} \end{aligned} \quad (8)$$

2.3 개루프 제어기

2.3.1 서셉턴스 계산

FC/TCR은 일종의 가변 서셉턴스 장치이므로 싸이리스터 점호각을 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_{TCR})을 구하기 위해 식 (9)에서 커패시터 बैं크의 서셉턴스(B_{FILTER})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.

$$i = \begin{cases} \frac{\sqrt{2}V}{X_L} (\cos\alpha - \cos\alpha') & : \alpha < \omega t < \alpha + \sigma \\ 0 & : \alpha + \sigma < \omega t < \alpha + \pi \end{cases} \quad (12)$$

푸리에 분석을 통해, 전류의 기본과성분만을 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 $\sigma = (6\pi X_L B_L)^{1/2}$ 이 얻어진다. 그러나, 결과식은 DSP의 연산시간을 증가시킬 뿐만 아니라 정확도가 떨어지기 때문에, 본 제어기에서는 서셉턴스 구간별로 σ 를 선형화하는 방식을 이용하였다. 점호각은 $\alpha = \pi - \sigma/2$ 관계에 의하여 얻을 수 있다.

2.4 페루프 제어기

2.4.1 무효전력제어기

무효전력제어기는 모선 무효전력을 조정하여 역률을 제어한다. 그림 2의 PQ calculator는 각 상을 단상으로 고려하여 모선의 유·무효전력을 계산한다. 계산된 결과를 식 (14)에 대입하면 각 상의 무효전력 오차(Q_{err})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 Δ -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 더해지면 무효전력 오차 보정이 가능해짐을 알 수 있다.

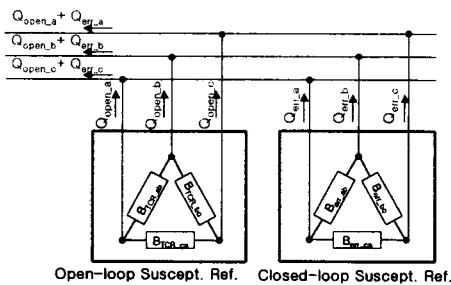


그림 4 페루프 제어기 개념도

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

$$B_{err_a} = \frac{Q_{err_a}}{V_a^2}, \quad B_{err_b} = \frac{Q_{err_b}}{V_b^2}, \quad B_{err_c} = \frac{Q_{err_c}}{V_c^2} \quad (15)$$

$$B_{err_ab} = \frac{B_{err_a} \cdot B_{err_b}}{B_{err_a} + B_{err_b} + B_{err_c}}$$

$$B_{err_bc} = \frac{B_{err_b} \cdot B_{err_c}}{B_{err_a} + B_{err_b} + B_{err_c}}$$

$$B_{err_ca} = \frac{B_{TCR_c} \cdot B_{TCR_a}}{B_{err_a} + B_{err_b} + B_{err_c}} \quad (17)$$

식 (17)에서 얻어진 서셉턴스값은 제어의 안정성을 위해 PI제어기를 통해 개루프 제어기의 도통각 기준치에 느리게 반영된다.

2.4.2 DC 제어기

직류성분은 주로 변압기의 반주기 포화현상 또는 TCR 역병렬 연결 싸이리스터의 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 싸이리스터에서 전압 불균형이 발생한 경우에 대한 등가회로이다. 그림에서 R_s 및 R_{TCR} 은 매우 작은 값이기 때문에 0.1V의 전압 옴셋에 대하여 수십~수백 Ampere의 직류전류를 발생시킬 수 있게 된다. 그러나, 실제 회로가 아래 등가회로와 같아지기 위해서는 시상수에 의해 수직선에서 수분까지의 시간이 필요하므로, 이를 방지하기 위한 제어기 및 보호회로가 요구된다.

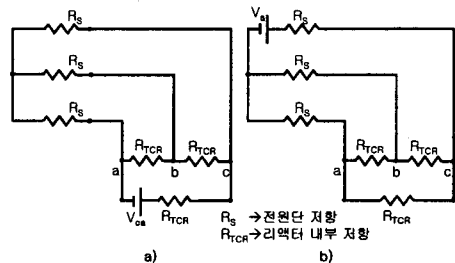


그림 5 DC 등가회로

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

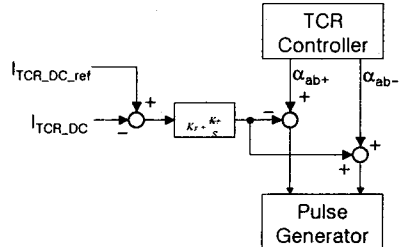


그림 6 DC 제어기 구조

2.5 시뮬레이션

표 1과 같은 조건하에 Matlab의 Simulink를 이용하여 FC/TCR의 불평형 부하 보상 시뮬레이션을 하였다. DC 아크로 부하를 등가 하기 위해, Y결선 3상 R-L 부하, 위상 제어정류기(PCR) 및 단상저항을 조합하여 구성하였다. 단상 저항은 3상 불평형을 발생하는 역할을 한다.

선전압	440V	SVC정격	33kVAr
3상 R-L	4kW, PF=C	PCR	500W, PF=C
단상 R	4.8kW, 40[입력변압기	100kVA, X=8

표 1 시뮬레이션 조건

그림 7-b에 나타낸 부하전류는 크기 및 위상에 있어 3

상 불평형을 보이고 있다. 제어기는 정상분 및 역상분 무효전류를 추출하여, 그림 7-d와 같은 보상 전류를 선로에 주입한다. 보상 결과로서 모선에는 그림 7-c와 같이 유효전류만 흐르게 되어, 전류간 위상불평형이 없어진다. 그림 7-e는 정상분 제어기만 동작시킨 경우이다. 역상분 무효전류가 남아있기 때문에 모선전류의 크기가 더 크고 전류간의 불평형도 일정치 않음을 보여준다.

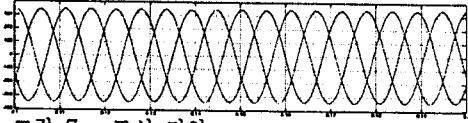


그림 7.a 모선 전압

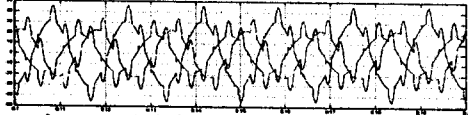


그림 7.b 부하전류

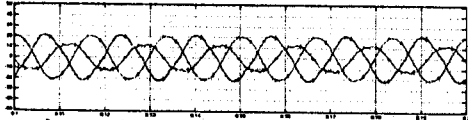


그림 7.c 불평형 제어시 모선전류

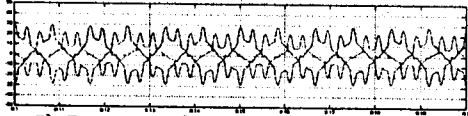


그림 7.d SVC 전류

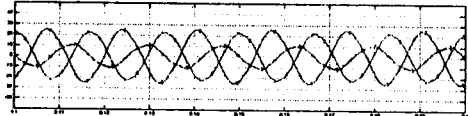


그림 7.e 정상분만 제어한 경우의 모선전류

2.6 실험결과

선전압	440V	SVC정격	33kVar
3상 R-L	10kW, PF=0.4	PCR	2kW, PF=0.6
단상 R	4kW, 45[Ω]	입력변압기	300kVA, X=8%

표 2 실험 조건

그림 8은 무부하상태에서의 상전압 파형으로 5 고조파 성분 및 전압크기의 불평형이 존재한다. 그림 9는 PCR (Phase Controlled Rectifier), R-L부하 및 단상 저항 부하를 투입하였을 때의 a상 상전압 및 각 상에서의 부하전류의 파형이다. ab상에 연결된 단상 저항은 a상 부하전류를 다소 진상으로 b상 부하전류를 지상이 되도록 하여 부하를 불평형으로 만든다. 이때 FC/TCR은 동작하지 않으므로 모선전류와 부하전류는 동일하다. 그림 10은 보상후의 상전압과 모선 전류를 나타내었다. 정상분 및 역상분 무효전류를 보상함으로써 모선전류의 역률 및 위상불평형이 개선되었다.

3. 결 론

본 논문에서는 무효전력보상장치중 현 시점에서의 수요가 가장 많은 FC/TCR방식의 SVC를 대용량 전기로부

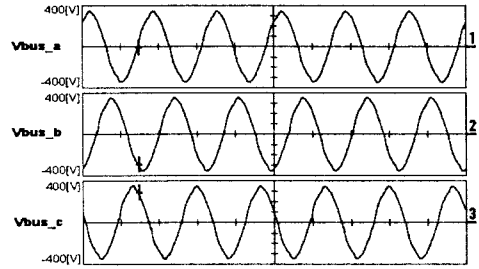


그림 8 무부하상태 입력 상전압

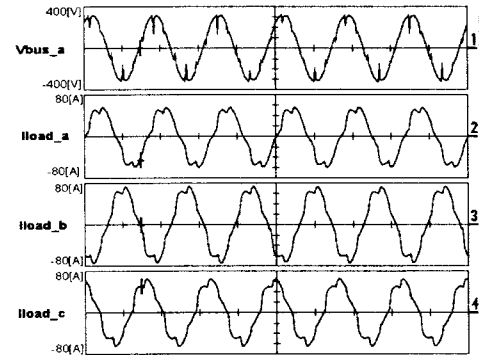


그림 9 부하투입시 a상 상전압 및 부하전류

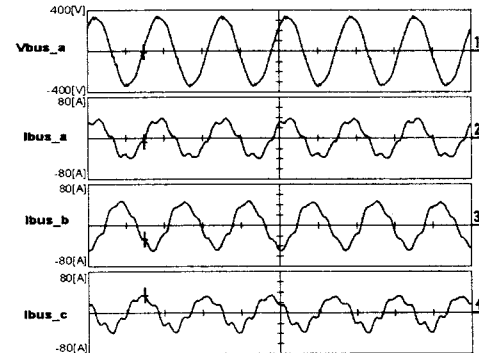


그림 10 보상후 a상 상전압 및 모선 전류

하에 적용하기 위한 알고리즘으로 불평형부하를 고려한 TCR의 각상제어를 논의하였다. 시뮬레이션과 실험을 통해 검증한바와 같이 역상분 무효전력에 의한 불평형성분을 제거할 수 있음을 알 수 있으며 이를 STATCOM이나 UPFC에 적용할 경우 유효전력에 의한 불평형도 제거할 수 있을 것으로 사료된다.

(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.