

# 전동차 사무소의 SVC 적용에 따른 고조파 발생에 관한 연구

(A Study on the Static Var Compensator Application for the train garage in Korean National Railroad: Analysis of Harmonic Generation of SVC)

이승혁\* · 이준경 · 김진오

(Seung-Hyuk Lee · Jun-Kyong Lee · Jin-O Kim)

## 요 약

교류 전기철도 시스템은 3상 전원으로로부터 전력을 수전 받지만, 철도부하는 단상이므로 열차가 운행될 경우 3상 전원 측에 전압불평형을 유발시키게 된다. 전기철도 시스템 중 전동차 사무소의 경우도 일반 3상부하와 비상용 철도 부하가 운영되므로 전압불평형 및 전압강하 현상이 발생하게 된다. 이러한 전압불평형이나 전압강하는 고조파 발생의 주원인이 되고, 고조파는 전동차 사무소의 정밀한 기기들의 오동작을 초래할 수 있다. 따라서, 전동차 사무소의 이러한 문제를 해결하기 위하여 본 논문에서는 SVC의 사용을 제안하였다. 또한 SVC를 이용하여 전동차 사무소의 전압불평형 및 전압강하를 보상할 경우 발생할 수 있는 고조파에 대해 PSCAD/EMTDC를 이용하여 분석하였다.

결과적으로, 전동차 사무소의 전압강하 및 전압불평형 보상을 위한 SVC는 전력품질을 향상시킨다는 것을 본 논문에서 확인하였다.

## Abstract

AC electric railroad system receives its power from 3-phase transmission system. Since, trainloads are changing continuously, the voltages for the single-phase load fluctuate in the train garage, and moreover, the fluctuating voltages generate high-order harmonics. This means that there is the difficulty in maintaining power quality in the power system. Therefore, a Static Var Compensator(SVC), which in general compensates the reactive power, is used in order to balance the trainload.

In this paper, PSCAD/EMTDC is used for the analysis of harmonic generation in the train garage using SVC. The Total Harmonic Distortion(THD) of voltages is calculated using PSCAD/EMTDC dynamic simulation. As a result, the train garage using SVC improves power quality.

Key Words : SVC, PSCAD/EMTDC, Harmonic, THD, Railroad

## 1. 서 론

철도 급전시스템은 단상 철도부하로 인하여 부하

불평형이 발생되고 있다. 이러한 부하 불균형으로 인하여 수전전압이 불평형하게 되어 역상분 전류가 흐르는 등 전력품질을 저하시키게 된다.

\* 주저자 : 한양대학교 대학원 전기공학과 박사과정

Tel : 02-2290-0347, Fax : 02-2297-1569

E-mail : leeh@ieee.org

접수일자 : 2003년 10월 23일

1차심사 : 2003년 11월 12일, 2차심사 : 2003년 12월 3일

심사완료 : 2003년 12월 22일

단상 철도부하로 인해 야기되는 전압불평형으로 인한 역상분 전류는 교류 회전을 과열시켜 철도 차량에 악영향을 미칠 수 있고, 변압기를 포화시키며 전동차 사무소 내부의 정류기 등에 맥동을 일으킨다.

상전압을 불균일하게 만드는 전압불평형은 가변속 구동장치인 철도차량뿐 아니라 프로세스 제어기 등과 같은 정밀부하의 오동작을 일으킬 수 있다 [1].

SVC는 기존의 동기조상기와 같은 조상설비보다 시스템의 동특성으로 빠르게 보상함으로써 역률을 개선하거나 부하 불평형에 대해 보상할 수 있기 때문에 전력품질의 저하로부터 전동차 사무소 급전시스템의 부하를 보호할 수 있다.

그런데, 불평형을 보상할 경우 SVC가 역상분 전류를 출력하여 직류전압의 맥동에 의해 출력에 고조파가 함유되게 된다.

본 논문에서는 단상 철도부하에 대해 발생할 수 있는 전압불평형 보상에 대한 SVC 적용으로 발생하는 역상분 전류로 인한 상전압 고조파 발생에 대한 분석을 PSCAD/EMTDC를 이용하였다 [2-4].

## 2. 불평형부하에 대한 SVC 동작특성

### 2.1 SVC 동작특성

SVC는 전력계통에 병렬로 연결되어 무효전력을 흡수·공급함으로써, 전압을 일정하게 유지하거나 원하는 제어동작을 수행하는 장치이다. 기존의 진상 무효전력 보상이인 전력용 콘덴서와 지상 무효전력 보상이인 병렬 리액터 등과는 달리, SVC는 연속적인 제어를 수행함으로써 동기조상기와 비슷한 제어 특성을 가지게 된다. 그러나 기계적인 관성을 가지고 있지 않아 동작범위 밖에서는 전압유지의 특성이 떨어지지만 제어의 응답속도가 동기조상기에 비해 매우 빠른 특성을 가지고 있다 [5].

그림 1은 전형적인 TCR(Thyristor-Controlled Capacitor)-FC(Fixed Capacitor) SVC의 구조 개략도이다. SVC는 그림 1과 같이 그 기본형태에 있어서 비교적 단순한 제어기이다. 모선에 직접 연결된 변압기가 있고, 커패시터와 병렬로 TCR이 연결되어 있으며 Thyristor의 점호각은 회로에 포함되는 리액턴스의 양을 조절한다. 이 점호각은 PI제어기에 의해 변화되며, 외란 후에 전압이 기준값에서 유지되도록 한다.

SVC는 빠른 응답속도와 연속적인 제어로 제어범위 내에서는 전압을 효과적으로 제어할 뿐만 아니라,

빠른 응답속도를 이용하여 과도상태의 유효전력을 제어함으로써 전력계통의 다양한 문제를 해결하기 위해 활용되고 있다. SVC의 기본적인 제어 목적은 모선전압의 제어에 있으며 부가적으로 과도안정도 향상, 전력동요억제, 상간 불균형 개선 등의 다양한 제어가 가능하다. SVC는 빠른 응답속도를 가지고 연속적으로 무효전력을 보상함으로써, 제어범위 내에서는 일정전압을 유지하고, 제어범위를 벗어나면 일반 전력용 콘덴서와 같은 특성을 보인다. 즉, 제어범위 내에서 SVC는 우수한 전압제어 특성을 나타낸다 [6-7].

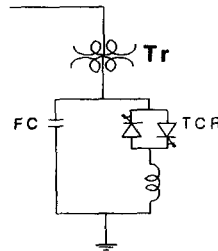


그림 1. TCR-FC SVC 기본형태  
Fig. 1. Basic construction of TCR-FC SVC

### 2.2 SVC의 전압보상과 불평형 3상 전류

전압, 전류, 쇄교속 등과 같은 변수들을 2축 고차좌표계로 변환하면 독립변수의 수가 감소하여 취급하기가 보다 간편하게 되지만, 이 변수들은 3상에서의 변수들과 마찬가지로 여전히 정현파 교류가 되므로 제어 알고리즘에 적용하기가 어렵다. 따라서, 이를 다시 동기속도  $\omega$ 로 회전하는 회전좌표계(d, q축)로 변환하면 직류성분으로 되어 취급하기 편리해진다[1].

전동차 사무소의 급전시스템의 단상부하에 의해 불균형이 생기면 전원 측 3상 전류의 불평형이 발생하게 되고 역상전류가 흐른다. 이로 인해 전원 측 발전기의 과열현상으로 출력저하와 기계적 진동의 원인이 되고, 동일모선의 전동기 출력감소 및 온도상승을 초래하고, 회전기 과열과 변압기 포화를 가져오게 된다.

좌표변환식을 이용하면 그림 2에서처럼 q, d, 0 축이 전원의 각주파수  $\omega$  [rad/sec]로 회전할 때를 동기좌표축이라 하며, 이때 q축과 a축 사이의 각은  $\theta (= \omega t)$ 가 된다. 전원 각주파수  $\omega$ 로 회전하는 성분에 대해 동기좌표축 q, d, 0 변수는 직류값을 갖게

된다. q축 성분은 유효 성분으로 나타나고 d축 성분은 무효성분으로 나타난다.

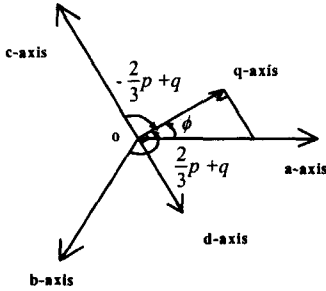


그림 2. a, b, c축과 q, d, 0축의 변환  
Fig. 2. Relationship between the a-b-c and q-d-0 quantities

3상 전력시스템에서 부하전류의 기본파 성분과 고조파 성분에 대한 일반 표현은 식 (1)부터 식 (3)과 같이 정상분 기본파 성분 ( $i_{ap1}$ )과 역상분 기본파 성분 ( $i_{am1}$ )의 합으로 표현할 수 있다.

$$\begin{aligned} i_{La} &= i_{ap1} + i_{am1} \\ &= I_{mp1} \cos(\omega t + \phi_{p1}) + I_{mn1} \cos(\omega t + \phi_{n1}) \end{aligned} \quad (1)$$

$$\begin{aligned} i_{Lb} &= i_{bp1} + i_{bn1} \\ &= I_{mp1} \cos(\omega t - \frac{2}{3} \pi + \phi_{p1}) \\ &\quad + I_{mn1} \cos(\omega t + \frac{2}{3} \pi + \phi_{n1}) \end{aligned} \quad (2)$$

$$\begin{aligned} i_{Lc} &= i_{cp1} + i_{cn1} \\ &= I_{mp1} \cos(\omega t + \frac{2}{3} \pi + \phi_{p1}) \\ &\quad + I_{mn1} \cos(\omega t - \frac{2}{3} \pi + \phi_{n1}) \end{aligned} \quad (3)$$

식 (1)~(3)의 3상 abc축 전류를 동기좌표축으로 변환하면, 식 (4), (5)와 같이 abc축 부하전류의 기본파는 정상분과 역상분의 합이 된다.

$$\begin{aligned} i_{La} &= i_{dp1} + i_{dn1} \\ &= I_{mp1} \cos \phi_{p1} + I_{mn1} \cos(2\omega t + \phi_{n1}) \end{aligned} \quad (4)$$

$$\begin{aligned} i_{Ld} &= i_{dp1} + i_{dn1} \\ &= -I_{mp1} \sin \phi_{p1} + I_{mn1} \sin(2\omega t + \phi_{n1}) \end{aligned} \quad (5)$$

여기서,  $I_{mp}$ ,  $I_{mn}$  : 정상과 역상 성분의 최대전류  
 $\phi_p$ ,  $\phi_n$  : 정상과 역상 성분의 임의의 각

SVC가 불평형 부하를 평형화하기 위해서는 부하 전류 중 역상분 전류를 제거해야 하기 때문에 식 (6)과 같이 보상전류  $i_{cq}$ 와  $i_{cd}$ 을 발생시켜야한다. 즉,  $I_2 = i_{Lm1} + i_{Ld1}$ 로부터 식 (6)을 유도해 낼 수 있다.

$$\begin{aligned} i_{cq} &= -(i_{Lm1}) \\ i_{cd} &= -(i_{Ld1}) \end{aligned} \quad (6)$$

식 (6)의 두 식은 보상전류의 유효분과 무효분을 각각 나타낸다. 이러한 단상 불평형 철도부하에 대한 SVC 보상동작으로 인해 고조파가 발생된다. 제 3 장 사례연구에서 전압불평형을 보상하기 위해 SVC를 설치했을 경우 발생하는 고조파에 대해 해석하였다.

### 3. 사례연구

#### 3.1 전동차 사무소의 급전시스템 모델링

본 논문에서는 전동차 사무소에 SVC를 설치하여 전압불평형을 보상하는 경우 발생하는 고조파 해석을 위해 PSCAD/EMTDC 시뮬레이션 결과를 이용하였다. PSCAD/EMTDC 시스템 설계사양과 그에 따른 설계 규제치는 다음과 같다.

(1) 조건

- 전원 임피던스 ( $R + jX$ ) : 5.21052+j13.4534 [%]
- 기준 용량 : 10 [MVA]
- 비상용 철도부하 : 5 [kVA], 단상 부하
- 비상용 철도부하 역률 : 0.9
- 전동차 사무소의 일반부하 : 4000 [kVA], 3상 부하
- 전동차 사무소의 일반부하 역률 : 0.8
- SVC의 용량 : 2 [MVA]
- 3상 진상 커패시터 용량 : 4 [MVA]

전동차 사무소의 SVC 적용에 따른 고조파 발생에 관한 연구

(2) 규제조건과 규제치

- 전압 불평형을  $\leq \pm 3$  [%]
- 고조파 전압 왜형을  $\leq 3$  [%]

위의 시뮬레이션 조건과 동일한 조건으로 PSCAD /EMTDC를 이용하여 발생하는 고조파 분석(THD)에 대해 시뮬레이션 한 결과를 제작사의 SVC 성능시험 결과와 비교, 분석하였다.

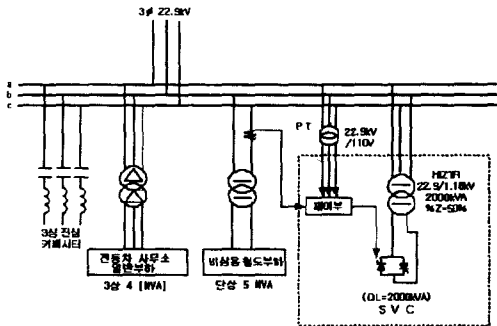


그림 3 전동차 사무소 부하 및 SVC 보상설비 단선도  
Fig. 3 Single-line diagram of feeding system of train base using SVC & 3-phase leading capacitors

그림 3은 이미 기본설계가 완료된 경춘선의 전동

차 사무소 3상 일반부하와 비상용 단상 철도부하, 그리고 SVC 보상기가 한전 22.9 [kV] 모선에 결선 되어 있는 단선 결선도이다. 현재 전동차 사무소의 전력품질 향상에 관한 보상기 설치 설계가 여러 부분 그림 3과 같은 형태로 진행되고 있다. 따라서 본 논문에서는 기존의 경춘선 차량기지의 기본설계 도면을 이용하여 그림 3과 같은 전동차 사무소를 시스템을 가정하였다.

이와 같은 설계도면과 설계사양을 가지고 그림 4와 같이 동적 시뮬레이션 프로그램인 PSCAD/EMTDC 을 이용하여 시스템을 모델링하였다 [4][8].

그림 4에서 단상 비상용 철도부하는 EMTDC의 ZIP부하 모델을 사용하여 설계사양을 만족시켰으며, PSCAD/EMTDC 설계는 선로 임피던스, SVC 용량, 단상 부하, 3상 일반부하 모두 기존의 설계사양과 동일하게 설정하였다. 단, SVC의 커패시터 뱅크 (Bank)는 2단으로 하였다.

3.2 SVC 설치 여부에 따른 전압불평형 시뮬레이션 결과 및 분석

본 논문에서 PSCAD/EMTDC 시뮬레이션은 크게 두 가지로 구분하여 실시하였다. 첫 번째는 SVC

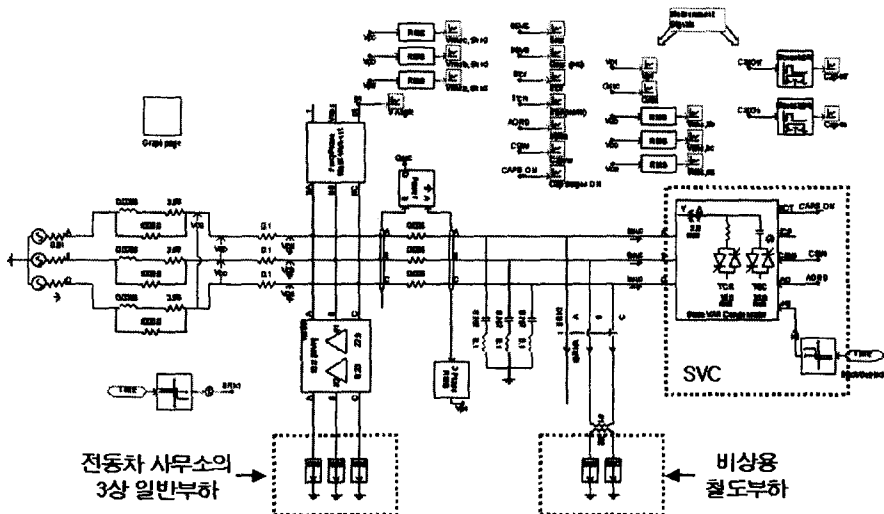
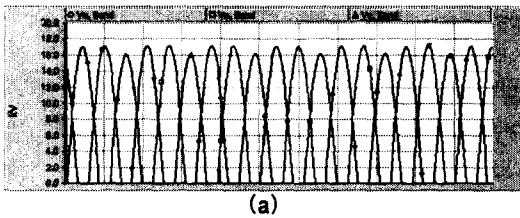


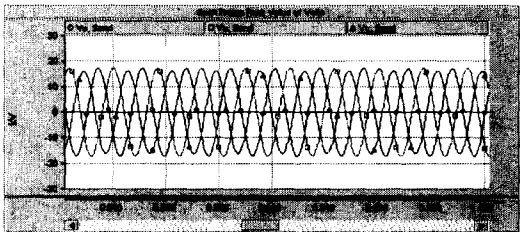
그림 4. PSCAD/EMTDC를 이용한 전동차 사무소 부하 및 SVC 설계도  
Fig. 4. PSCAD/EMTDC's design of feeding system of train base with SVC

를 전동차 사무소 급전시스템에 설치하지 않은 경우이고, 두 번째는 SVC를 설치했을 경우이다. 또한 PSCAD/EMTDC를 이용한 시뮬레이션을 동적으로 보이기 위하여 1 [Sec]까지는 비상용 부하와 전동차 사무소의 일반 부하가 모두 한전 모선(22.9 [kV])에 연결되어 있다가 1 [Sec] 시점에서 바로 비상용 철도 부하를 차단하는 것으로 시뮬레이션 하였다.

고조파를 발생시키는 주원인이 되는 불평형 부하인 단상 철도부하가 전동차 사무소의 급전시스템에 운영되는 경우에 대해 SVC가 설치되어 있는 경우에 대해 각각 시뮬레이션 결과는 그림 5부터 그림 8과 같다.



(a)



(b)

그림 5. 22.9 [kV] 선로의 1 (Sec)까지의 상전압 파형  
Fig. 5. Each phase voltage in 22.9 [kV] during 1 {sec}

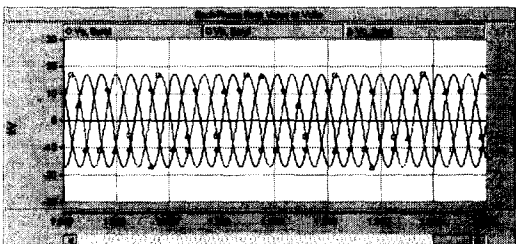


그림 6. 22.9 [kV] 선로의 1 (Sec)부터 2(Sec)까지의 상전압 파형  
Fig. 6. Each phase voltage in 22.9 [kV] during 1~2 (Sec)

그림 5와 6은 22.9 [kV] 선로의 각 실효치 상전압

을 나타낸 것이다. 그림 5(a)는 전동차 사무소 일반 부하와 비상용 철도부하가 연결되어 있는 1 [Sec]까지의 전압 파형인 그림 5(b)의 양(+)의 전압 파형으로서, 각 상의 최대치가 각각 차이가 나고 있음을 볼 수 있다. 그림 6은 3상 평형 일반부하만이 22.9 [kV] 선로에 연결되어 3상이 평형임을 알 수 있다.

또한, 그림 7은 SVC를 설치하지 않았을 경우와 동일하게 실효치 선간전압인 22.9 [kV]를 실효치 상전압으로 초기상태부터 1 [Sec] 동안 측정된 파형 그래프이다. 그림 5에서와 같이 SVC를 설치하지 않았을 경우에는 시간이 1 [Sec]일 때까지는 a, b, c상의 실효치 상전압이 불평형한 것이 관측되었지만, 병렬 보상기인 SVC의 설치로 인해 불평형이 거의 제거되었음을 그림 7에 의해 확인할 수 있다. 그림 8은 1 [Sec] 이후에 3상 평형 일반부하만이 22.9 [kV] 선로에 연결되어 3상이 평형임을 알 수 있다.

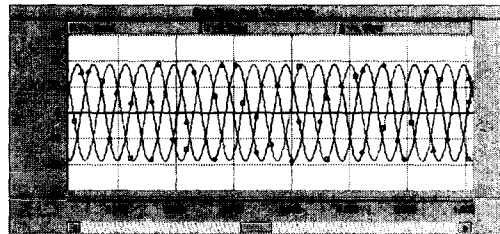


그림 7. SVC가 설치된 경우 22.9 [kV] 선로의 1(Sec)까지의 상전압 파형  
Fig. 7. Each phase voltage in 22.9 [kV] line with SVC during 1 (sec)

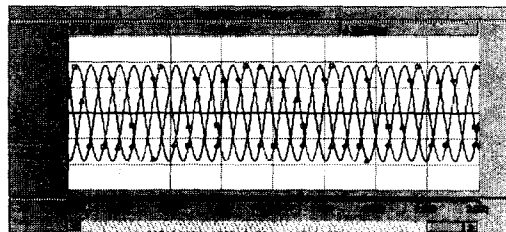


그림 8. SVC를 설치한 경우의 22.9 [kV] 선로의 1 (Sec)부터 2 (Sec)까지의 상전압 파형  
Fig. 8. Each phase voltage in 22.9 [kV] line with SVC during 1~2 (Sec)

위의 PSCAD/EMTDC 시뮬레이션 결과의 데이터를 가지고 계산한 전압페이즈 벡터도는 그림 9와

전동차 사무소의 SVC 적용에 따른 고조파 발생에 관한 연구

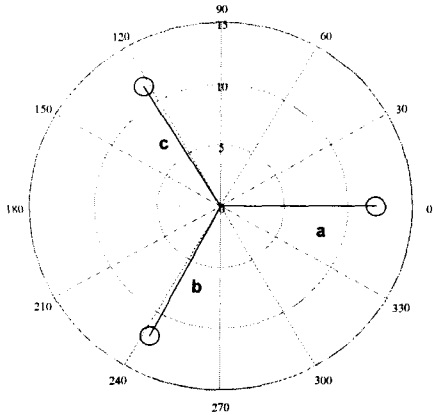


그림 9. SVC를 설치하지 않았을 경우 전압벡터도  
Fig. 9. Vector diagram of condition without SVC

10과 같다. 그림 9는 SVC를 설치하지 않았을 경우의 3상 전압 불평형 벡터도를 나타낸다. 그림에서 볼 수 있듯이 크기는 각 상마다 차이가 있고, 위상각도 120°에서 벗어나고 있음을 알 수 있다. 그림 10은 SVC를 설치하여 전압 불평형을 보상한 경우의 3상 전압 벡터도이다. 그림에서 보는바와 같이 거의 3상 평형임을 알 수 있다.

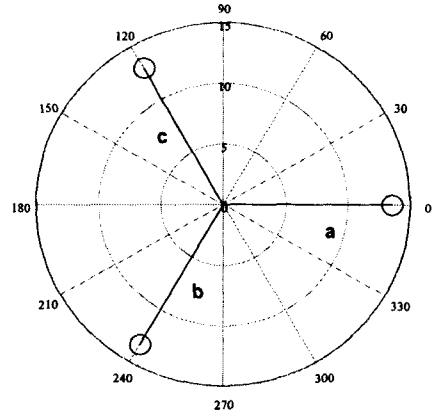


그림 10. SVC를 설치한 경우 전압벡터도  
Fig. 10. Vector diagram of condition with SVC

알고리즘을 이용하여 해석할 수 있다. 주기  $T$ 인 함수를  $f(t) = f(t+T)$ 로 정의하면, 이것을 다음 식 (7) 과 같이 푸리에 급수로 전개할 수 있다.

$$f(t) = a_0 + a_1 \cos \omega t + a_2 \cos 2\omega t + \dots + a_n \cos n\omega t + b_1 \cos \omega_0 t + b_2 \cos 2\omega_0 t + \dots + b_n \cos n\omega_0 t \quad (7)$$

식 (7)을 다시 정리하면 식 (8)과 같이 된다.

$$f(t) = a_0 + \sum_{n=1}^{\infty} a_n \cos n\omega_0 t + \sum_{n=1}^{\infty} b_n \sin n\omega_0 t \quad (8)$$

여기서,  $\omega_0 = \frac{2\pi}{T} = 2\pi f_0$ 이다.

### 3.3 전동차 사무소 급전시스템의 전압 고조파 분석

고조파 해석은 푸리에 변환(Fourier Transform)

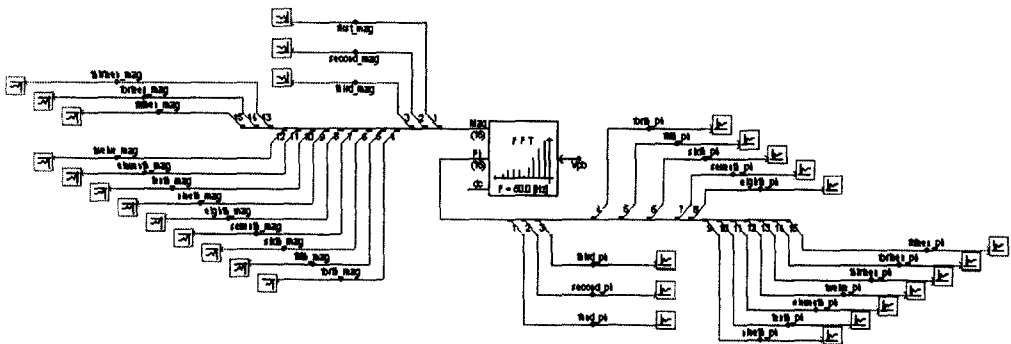


그림 11. PSCAD/EMTDC의 고조파 해석기  
Fig. 11. Harmonic analyzer of PSCAD/EMTDC

동적 시뮬레이션 프로그램인 PSCAD/EMTDC는 이미 라이브러리에서 고조파 해석을 용이하게 할 수 있도록 지원하고 있다. 그림 11은 PSCAD/EMTDC를 이용하여 설계한 15차 고조파 해석기이다.

SVC 제작사의 성능시험 결과와 비교하기 위하여 본 논문에서는 15차 고조파까지 해석하였다. 고조파 왜형률(THD)에 대한 SVC 제작사의 성능시험 결과는 표 1과 같다.

표 1. SVC 제작사의 THD 성능시험 결과  
Table 1. THD (%) of SVC manufacturer's performance

Harmonic	3	5	7	9	11	13	결과
THD [%]	2.24	1.20	0.79	0.68	0.66	0.35	2.82 [%]

그림 12와 그림 13은 PSCAD/EMTDC를 이용하여 15차 고조파까지 성분을 FFT(Fast Fourier Transform) 필터링 한 결과 그래프이다. 그림 12는 전압크기에 대한 필터링 결과를 보여준다. 그림 12에서 기본파를 제외한 각 고조파들의 크기가 작기는 하지만 존재하고 있음을 알 수 있다. 자세한 각 고조파의 크기는 그림 13에 나타내었다.

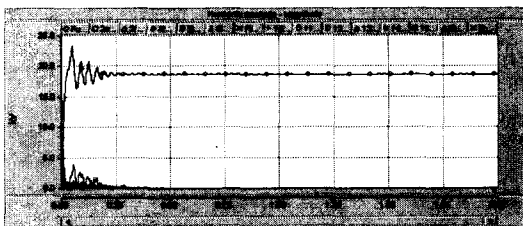


그림 12. SVC를 설치한 경우 22.9 [kV] 선로의 전압크기에 대한 각 고조파 필터링 그래프  
Fig. 12. Filtered harmonics magnitude of 22.9 [kV] line with SVC

위의 그림 12의 PSCAD/EMTDC 시뮬레이션의 결과 데이터를 이용하여 THD는 식 (9)에 의해 구할 수 있다.

$$THD[\%] = \frac{\sqrt{\sum_{i=2}^{15} V_i^2}}{V_1} \times 100 \quad (9)$$

식 (9)와 PSCAD/EMTDC의 고조파 해석기를 이용하여 고조파를 분석하면, 전동차 사무소 급전시스템에 SVC 설치시 발생하는 고조파 중 기본파의 크기는 18.68 [kV] 이고, 2차 고조파부터 15차 고조파까지 각 고조파의 크기는 그림 13과 같다. 여기서, 시뮬레이션 시간 중 0.25 [Sec]까지는 설계자가 부여한 임의의 과도상태이다. 결국, THD는 식 (9)와 식 (10)에 의하여 가장 악조건(전동차 사무소의 3상 일반부하 및 비상용 철도부하가 모두 운영되는 경우)일 경우 2.185 [%]이다. 이 시뮬레이션의 계산결과 규제치 3 [%] 미만의 고조파왜형률이 만족함을 알 수 있다.

$$THD_{total} = \frac{THD_a + THD_b + THD_c}{3} \quad (10)$$

여기서,  $THD_a, THD_b, THD_c$ : 각 상의 THD

또한, 이미 연구된 문헌[8]과 PSCAD/EMTDC 시뮬레이션 결과에서 보는바와 같이 전력전자 설비를 이용하면 홀수차 고조파만 발생하는 것이 아니라 짝수차 고조파도 발생함을 알 수 있다. 따라서 특성 고조파인 3, 5, 7, 9, 11, 13차인 홀수 고조파 외에 비특성 짝수 고조파에 대해서도 고려해야 한다.

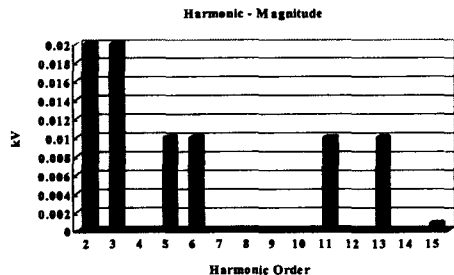


그림 13. SVC 설치시 경우 22.9 [kV] 선로의 전압 크기에 대해 발생하는 각 고조파의 크기와 종류  
Fig. 13. Voltage's filtered harmonics magnitude of 22.9 [kV] line with SVC

모의한 시스템에서 고조파 발생의 원인은 다음과 같이 크게 2가지로 볼 수 있다.

- 단상 철도부하가 운행되기 때문에 3상에 대한 불평형이 발생하게 되고 그로 인한 고조파 발생
- 이러한 3상의 불평형을 보상하기 위한 보상기

설치시 전력전자 소자의 스위칭으로 인한 고조파 발생

발생되는 각 고조파의 크기는 시스템의 부하변동과 그에 따른 SVC의 동작상황에 따라 변화될 수 있다.

따라서, 본 논문에서 모의한 시스템에 대한 15차 고조파까지의 해석결과는 다음과 같다. 전동차 사무소에 SVC를 적용했을 경우 발생할 수 있는 고조파와 그 크기는 기본파를 제외하고 그림 13과 같이 2, 3, 5, 6, 11, 13차 고조파가 발생되고 있음을 확인할 수 있다. 그러나 고조파 왜형률을 계산해 본 결과 고조파의 대한 규제치 이내로 시스템이 운영되고 있기 때문에 전력품질 면에서도 이상이 없음을 확인하였다.

#### 4. 결 론

본 논문에서는 전동차 사무소에 단상 철도부하로 인한 전압불평형에 대해 이미 상용화되어 있는 SVC 적용의 적절성 중 급전시스템에 발생하는 고조파를 분석하였다. 단상 철도부하로 인한 전압불평형을 보상할 경우 SVC의 역상분 전류 발생으로 인해 발생하는 고조파는 특성 고조파 이외의 비특성 고조파도 발생함을 PSCAD/EMTDC 시뮬레이션 결과로 확인하였다. 또한, 전동차 사무소 급전시스템의 운영상태 중 가장 약조건에 대해 SVC가 전압강하 및 전압불평형에 대해 보상 동작한 경우에도 발생한 고조파에 대한 왜형률이 규제치 이하로 나오는 것을 확인하였다.

#### References

- (1) 임수생, 이은웅, 김흥권, "불평형 부하의 평형화를 위한 STATCOM 제어", 대한전기학회 논문지, Vol. 49B, No. 8, pp. 522-528, 2000. 8.
- (2) 정현수, 이승혁, 김진오, "STATCOM을 이용한 교류 전기철도 급전시스템의 전압강하 보상", 한국조명전기설비학회 논문지, Vol. 16, No. 5, pp. 83~89, 2002. 9.
- (3) 정현수, 이승혁, 김진오, "단권변압기 교류전기철도 급전시스템의 전차선 전압해석", 대한전기학회 논문지, Vol. 52A, No. 9, 2003. 9.
- (4) H.S Jung, S.H Lee Jin-O Kim, "Analysis for Autotransformer Fed AC Electric Railroad System using Constant Current Mode with Distribution STATCOM",

MEPS(Modern Electric Power Systems), Wroclaw, Poland, 2002. 9.

- (5) N. G. Hingorani, L. Gyugyi, "Understanding FACTS", IEEE Press, 2000.
- (6) 免束哲天 "自動式 電力變換裝置 によるき 電側 電力 融通方式 交流電氣鐵道用 電壓變動 補償裝置の 開發", 電氣學會論文 D 115卷, 12號, pp. 1521~1228, 1995. 2.
- (7) 常盤幸生 "電力系統用 自動式 SVCの 開發", 電氣學會論文 113卷, 2號, pp. 168~175, 1993.
- (8) Krazimierz Wilkoz, Wieslaw Kwasnicki, "The Analysis of Harmonic Generation of SVC and STATCOM by EMTDC/PSCAD Simulation", ICHOP '98, Athens, Greece, 1998. 8.

#### ◇저자소개◇

##### 이승혁 (李丞赫)

1974년 8월 3일생. 2001년 세명대 전기공학과 졸업. 2003년 한양대 대학원 전기공학과 공학석사. 2003년~현재 동 대학원 박사과정.

##### 이준경 (李埈敬)

1962년 1월 29일생. 1993년 서울산업대 전기공학과 졸업. 2001년 한양대 대학원 전기공학과 공학석사. 2001년~현재 동 대학원 박사과정.

##### 김진오 (金鎭吾)

1956년 1월 17일생. 1980년 서울대 전기공학과 졸업. 1983년 동 대학원 전기공학과 공학석사. 1990년 Texas A&M University 전기공학과 공학박사. 1987년~현재 한양대 전기공학과 부교수.