

전동차 사무소의 전압불평형 보상을 위한 SVC 적용에 관한 연구

(A Study on the Static Var Compensator Application for Compensating the Train Garage's Unbalanced Voltages in Korean National Railroad)

이준경* · 이승혁 · 김진오

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

요 약

본 논문에서는 전동차 사무소에서 FACTS 설비 중 전기철도시스템에 일반적으로 많이 사용되고 있는 SVC 적용에 대해 검토하였다. 전기철도 급전계통 중 전동차 사무소의 비상용 철도부하와 일반부하에 따른 전압변동, 전압강하, 전압불평형의 보상에 관해 SVC(Static Var Compensator)의 적용이 적절한가에 대한 검토에 대한 연구가 필요하다. 이에 따라 SVC 도입 검토를 위해 이미 적용된 설계사양을 기본으로 PSCAD/EMTDC 시뮬레이션을 이용하여 전동차 사무소에 SVC를 적용하였을 경우 전압변동, 전압강하 및 전압불평형 각 항목의 결과를 도출하고, 이를 SVC 제작사의 성능시험과 비교하였다.

Abstract

AC electric railroad system receives its power from 3-phase transmission system. Since, trainloads are moving continuously, the voltages for the single load fluctuate in the train garage, and moreover, the fluctuating voltages generate high-order harmonics. This means the difficulty in maintaining power quality in the power system. Therefore, in this paper, the adequacy of SVC application is investigated for the train garage in KNR(Korean National Railroad). Voltage drop, voltage regulation, and unbalanced voltages are assessed in the train garage for the condition of power system both with SVC and without SVC. In this paper, PSCAD/EMTDC is used for the above assessment items, and the results are compared with ones which was already designed in the field in practice for the train garage. As a result, the train garage using SVC improves power quality.

Key Words : SVC, PSCAD/EMTDC, Voltage Drop, Unbalanced Voltages, Railroad

1. 서 론

국내 전기철도 실 계통에 FACTS(Flexible AC

Transmission System) 기기를 적용하기 위해서는 먼저 외국의 적용사례와 국내 여건 등을 충분히 고려하여 예상되는 여러 경우에 대하여 시뮬레이션을 통해 그 효과를 검증하지 않으면 안 된다.

우리나라는 전기철도 역사가 짧지만 경부선 고속전철 건설을 계기로 경부선, 호남선 등 신설 및 기존선 전철화 사업이 급속도로 활성화되고 있으며, 남북한 중단철도와 시베리아, 중국을 통한 대륙철도

* 주저자 : 한양대 대학원 전기공학과 박사과정
Tel : 02-2290-0347, Fax : 02-2297-1569
E-mail : leejunk1@chollian.net
접수일자 : 2003년 10월 23일
1차심사 : 2003년 11월 12일
심사완료 : 2003년 11월 27일

연계방안도 심도있게 논의되고 있다. 이와 같이 전기철도는 국내에 국한되지 않고 국제철도와 연계되는 세계화 흐름 속에 들어서고 있다고 볼 수 있다.

따라서 본 논문에서는 이 같은 현실적인 필요성과 향후 전기철도의 활성화 및 국제철도와의 연계에 대비하기 위하여 전기철도에서 가장 중요시되고 있는 급전품질 향상 대책을 연구하는 것이 목적이며 이를 통해 원활한 전철 운용이 가능하게 된다. 따라서 외국에서 이미 전기철도에 실용화되어 효과적으로 사용하고 있는 SVC 설비를 국내 전기철도 전동차 사무소에 적용하는 방안을 시뮬레이션을 통해서 연구 검토하였고, 본 논문은 특히 전동차 사무소에 SVC 적용이 적절한가에 연구 초점을 맞추었다. 따라서 SVC 적용 검토를 위해 이미 설계된 사양을 기반으로 PSCAD/EMTDC 시뮬레이션을 이용하여 각 항목의 결과를 도출하고, 이를 SVC 제작사의 설계된 성능시험과 비교하는데 연구 초점을 두었다.

2. SVC의 동작특성과 보상원리

2.1 SVC 동작특성

SVC는 전력계통에 병렬로 연결되어 무효전력을 흡수·공급함으로써, 전압을 일정하게 유지하거나 원하는 제어동작을 수행하는 장치이다. 기존의 진상 무효전력 보상기인 전력용 콘덴서와 지상 무효전력 보상기인 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 [1].

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 내

에서는 일정전압을 유지하고, 제어범위를 벗어나면 일반 전력용 콘덴서와 같은 특성을 보인다. 즉, 제어범위 내에서 SVC는 우수한 전압제어 특성을 나타낸다 [2].

2.2 SVC의 보상원리

송전시스템에서 무효 병렬보상기(SVC)를 설치하는 궁극적인 목적은 송전선로의 전기적 특성을 바꿔 리액터로 경부하시 과전압을 최소화하여 선로를 보호하고 커패시터로서 과부하시 전압등급을 유지시켜 부하수요를 만족시키며 전송전력을 증가시키기 위함이다. 또한 정상상태 송전 특성뿐만 아니라 부하의 증가에 따른 시스템 안정도도 개선시키며, 전압 조정기로도 사용되어 송전선로 중간과 말단에 설치되어 전압 불안정을 막을 뿐만 아니라 과도 안정도를 증가시키고 전력 동요를 감소시킨다 [3].

그림 1 (a)는 간단한 2기 송전시스템 모델로서 이상적인 SVC가 송전선로 중간지점(Midpoint)에 연결되어 있으며, 선로에는 직렬로 인덕턴스가 연결되어 있고 SVC는 정현파 전압을 갖는다.

중간지점의 전압은 V_m 이고 송전, 수전 전압은 동일한 크기의 전압 ($V_m = V_s = V_r = V$)을 갖는다고 가정하고 송전선로를 2개의 독립적인 부분으로 분할하면, 첫 번째 부분의 임피던스는 $X/2$ 이고, 송전전력은 송전선 말단부분에서 중간지점까지의 전력이다. 두 번째 부분의 임피던스 또한 $X/2$ 이고 송전전력은 중간지점에서 수전단 끝 부분이다.

전압 $V_s, V_r, V_m, V_{sm}, V_{mr}$ 과 분할선의 각각의 전류 I_{sm}, I_{mr} 의 관계는 그림 1 (b)의 벡터도로 보여주는데, 중간 지점에 연결된 SVC는 송전선로에서 단지 무효전력만을 교환하며, 손실이 없는 시스템이라고 가정할 때, 각각의 선로의 말단(송전단, 중간지점, 수전단)의 유효전력은 같다. SVC가 설치되어 있는 중간지점의 전압과 유입되는 전류는 식 (1)과 같다.

$$\begin{aligned} V_{sm} &= V_{mr} = V \cos \frac{\delta}{4} \\ I_{sm} &= I_{mr} = I = \frac{4V}{X} \sin \frac{\delta}{4} \end{aligned} \quad (1)$$

송전전력은 식 (2)와 같이 표현된다.

$$\begin{aligned}
 P &= V_{sm} I_{sm} = V_{mr} I_{mr} \\
 &= V_m I_{sm} \cos \frac{\delta}{4} = VI \cos \frac{\delta}{4}
 \end{aligned}
 \tag{2}$$

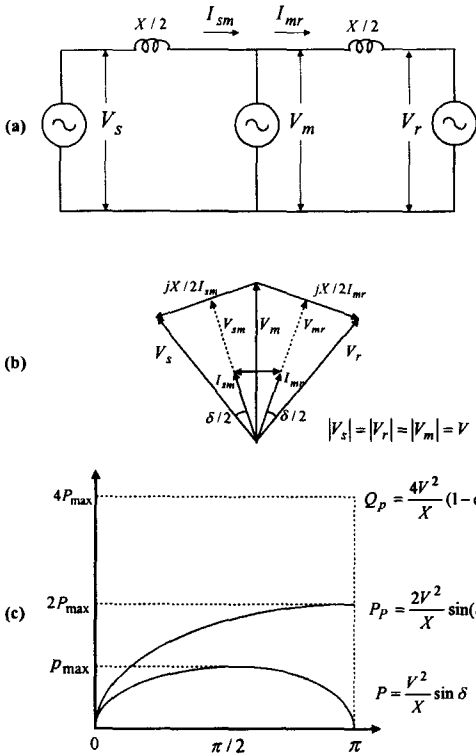


그림 1. (a) SVC 설치된 2기 송전시스템, (b) 벡터도, (c) 유·무효전력 특성곡선
 Fig. 1. (a) Two-machine power system with ideal SVC, (b) phasor diagram, (c) power transmission vs. angle characteristic showing the variation

유효전력 $P = 2 \frac{V^2}{X} \sin \frac{\delta}{2}$ 와 유사하게 무효전력은 식 (3)과 같다.

$$Q = V I \sin \frac{\delta}{2} = 4 \frac{V^2}{X} (1 - \cos \frac{\delta}{2})
 \tag{3}$$

그림 1 (c)는 이상적인 SVC에서, 유효전력 P , 무효전력 Q 와 전력각 δ 와의 관계를 보여준다. 중간지점에 위치한 SVC는 급격하게 증가한 무효전력을 보

상하여 송전전력을 최대값의 2배 정도 증가시킨 것을 알 수 있다.

이와 같이 계통에 설치된 SVC는 무효전력 및 유효전력을 보상함으로써 전압강하를 보상하고, 전압불평형의 주된 원인이 되는 전압강하가 보상됨으로써 전압불균등 및 전압불평형을 보상하게 되는 것이다. 특히 전동차 사무소에 단상 부하인 비상용 철도 부하가 운전하게 되면 이러한 전압강하로 인한 전압 불평형은 더욱 심각해 질 것이다. 이러한 전동차 사무소의 전압강하와 전압불평형을 보상하기 위하여 EMTDC 시뮬레이터를 이용하여 SVC 적용을 검토하였다.

제 3 장 사례연구에서는 한전 계통과 연계된 전동차 사무소를 일반부하와 철도부하로 나누어 모델링하고 그에 따른 전압강하, 전압불평형, 전압변동에 대해 시뮬레이션 하였다.

3. 사례연구

3.1 전동차 사무소의 급전시스템 모델링

본 논문에서 비용적인 측면은 고려하지는 않았지만 SVC의 용량에 비례해서 설비 투자비가 상승하는 것은 당연하다. 따라서 기존의 연구에서 제안된 방법인 3상 진상 커패시터와 SVC의 혼용이 전력품질 측면에서 전동차 사무소 급전시스템에 적용 가능함에 대해 PSCAD/EMTDC를 이용하여 시뮬레이션 하였다. 이는 SVC의 용량을 원하는 보상량 만큼 높이는 것보다 3상 진상 커패시터를 혼용함으로써 경제적 측면을 고려하기 위함이다.

연구목적에 부합된 결과를 도출하기 위하여 시뮬레이션은 다음과 같은 3가지 영역에 대해 행하였다.

- 전압강하(전압강하율)
- 전압변동(전압변동율)
- 전압불평형(전압불평형율)

SVC를 설치했을 경우 전동차 사무소의 비상용 전철부하에 대해 위의 3가지 사항에 관한 모의실험의 조건과 그에 따른 설계 규제치는 다음과 같다.

1) 조건

- 전원 임피던스 ($R + jX$) : 5.21052+j13.4534 [%]

전동차 사무소의 전압불평형 보상을 위한 SVC 적용에 관한 연구

- 기준 용량 : 10 [MVA]
- 비상용 철도부하 : 0~3486 [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]

2) 규제조건과 규제치

- 전압 불평형을 $\leq \pm 3$ [%]
- 전압변동을 $\leq \pm 3$ [%] (약 3~5 [%])
- 고조파 전압 왜형률 ≤ 3 [%]

위의 시뮬레이션 조건과 동일한 조건으로 PSCAD /EMTDC를 이용하여 차량기지를 모델링하고 각 항목에 대해 시뮬레이션 한 결과를 제작사의 SVC 성능시험 결과와 비교, 분석하였다.

각 항목(전압강하, 전압변동, 전압불평형)에 대해 시뮬레이션하기 위해서 우선 전동차 사무소의 급전 시스템 및 부하들에 대한 모델링이 선행되어야 한다.

그림 2는 전동차 사무소 3상 일반부하와 비상용 단상 철도부하, 그리고 SVC 보상기가 한전 22.9

[kV] 모선에 결선 되어 있는 기존에 설계된 단선 결선도이다.

이와 같은 설계도면과 설계사양을 가지고 그림 3과 같이 동적 시뮬레이션 프로그램인 PSCAD/EMTDC 을 가지고 시스템을 모델링하였다 [4-6] [9].

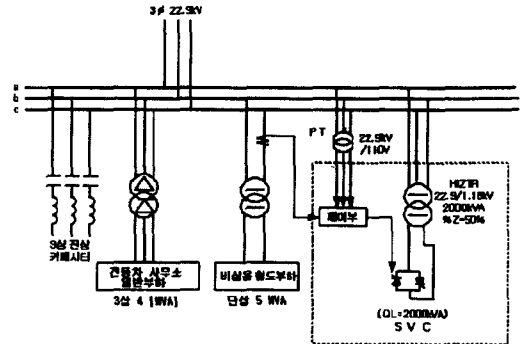


그림 2. 전동차 사무소 부하 및 SVC 보상설비 단선도
Fig. 2. Single-line diagram of feeding system of train base using SVC & 3-phase leading capacitors

그림 3에서 단상 비상용 철도부하는 EMTDC의 ZIP부하 모델을 사용하여 설계사양을 만족시켰으며, PSCAD/EMTDC 설계는 선로 임피던스, SVC 용량,

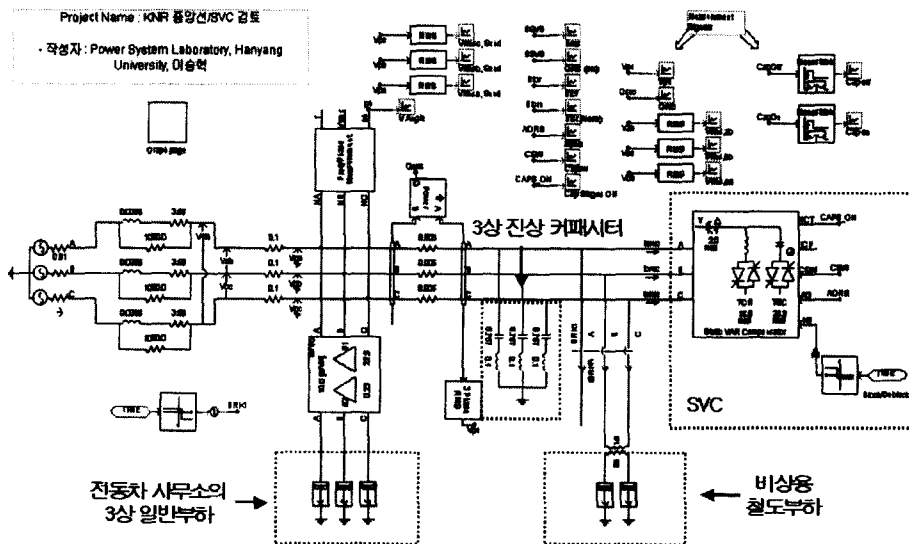


그림 3. PSCAD/EMTDC를 이용한 전동차 사무소 부하 및 SVC 설계도
Fig. 3. PSCAD/EMTDC's design of feeding system of train base with SVC

단상 부하, 3상 일반부하 모두 기존의 설계사양과 동일하게 설정하였다. 단, SVC의 커패시터 뱅크(Bank)는 2단으로 하였다.

3.2 PSCAD/EMTDC 시뮬레이션 결과

PSCAD/EMTDC 시뮬레이션은 크게 두 가지로 구분하여 실시하였다. 첫 번째는 SVC를 전동차 사무소 급전 시스템에 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 모선(22.9 [kV])에 연결되어 있다가 1 [Sec] 시점에서 바로 비상용 철도부하가 차단되게 시뮬레이션하였다.

3.2.1 SVC를 설치하지 않은 경우

우선 각 항목에 필요한 변수들을 얻기 위해 설계된 PSCAD/EMTDC 시스템을 시뮬레이션하였다. 그림 4는 기준전압($V_{ref} : 1$ [PU])에 현재 한전의 22.9 [kV]측 전압(V_{pu})이 어떻게 변화되고 있는지를 보여주고 있다. 현재 측정 전압이 기준전압에 미치지 못함을 볼 수 있다.

그림 5는 실효치 선간전압인 22.9 [kV]를 실효치 상전압으로 2 [Sec] 동안 측정한 파형 그래프이다. 여기서 시간이 1 [Sec]일 때까지는 A, B, C상의 실효치 상전압이 불평형한 것이 확연히 관측되고 있다가 비상용 단상 철도부하가 제거된 시점(1 [Sec] 이후)부터는 3상전압이 평형한 것이 관측되는 것을 볼 수 있다.

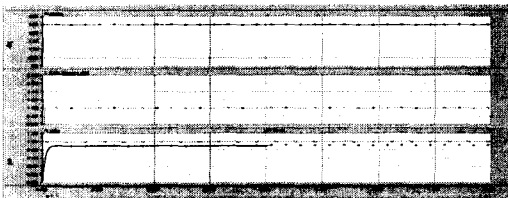


그림 4. 기준전압과 계통전압의 관계 그래프
Fig. 4. Correlation between reference voltage and measured voltage

그림 6과 7은 22.9 [kV] 선로의 각 실효치 상전압

을 나타낸 것이다. 그림 6은 전동차 사무소 일반부하와 비상용 철도부하가 연결되어 있는 1 [Sec]까지의 전압 파형으로 각 상의 최대치가 차이가 나고 있음을 볼 수 있다. 그림 7은 3상 평형 일반부하만이 22.9 [kV] 선로에 연결되어 3상이 평형임을 알 수 있다.

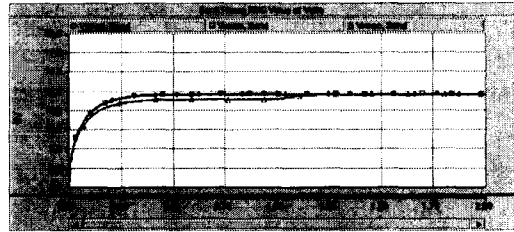


그림 5. 22.9 [kV] 선로의 실효치 상전압 파형
Fig. 5. RMS phase voltage in 22.9 [kV] line per phase

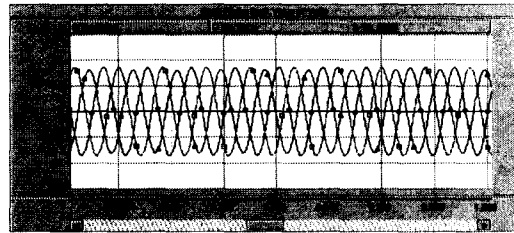


그림 6. 22.9 [kV] 선로의 1 [Sec]까지의 상전압 파형
Fig. 6. Each phase voltage in 22.9 [kV] during 1 (sec)

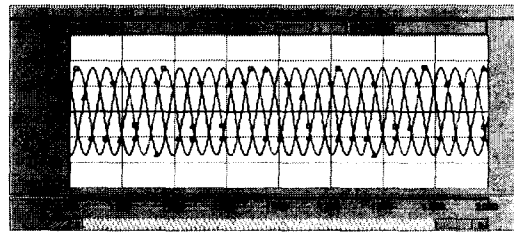


그림 7. 22.9 [kV] 선로의 1 [Sec]부터 2 [Sec]까지의 상전압 파형
Fig. 7. Each phase voltage in 22.9 [kV] during 1~2 (Sec)

3.2.2 SVC를 설치한 경우

그림 8의 첫 번째 그래프는 전동차 사무소의 3상 일반부하 및 비상용 철도부하가 모두 운영되고 있는 1 [Sec]의 시뮬레이션 시간까지 SVC 보상동작에 따

은 SVC의 thyristor의 점화각의 변화를 보여준다.

그림 8의 두 번째 그래프는 계통전압에 따라 보상해야 하는 만큼의 전압을 보상하기 위하여 동작되고 있는 커패시터 뱅크의 수를 나타내고 있다. 전동차 사무소의 3상 일반부하와 단상 철도부하에 대한 SVC가 보상하는 1 [Sec]까지는 커패시터 뱅크가 계통전압을 1 [PU]로 유지하기 위해 2개 혹은 1개로 On/Off 하고 있음을 알 수 있다.

마지막으로 그림 8의 세 번째 그래프는 기준전압 (V_{ref} : 1 [PU])에 현재 한전의 22.9 [kV]측 전압 (V_{pu})이 어떻게 변화되고 있는지를 보여주고 있다. SVC가 설치되지 않은 결과 그래프인 그림 4와 비교하면 SVC가 전동차 사무소의 3상 일반부하와 단상 철도부하에 대해 전압강하와 전압불평형에 대해 보상하고 있는 것을 알 수 있다.

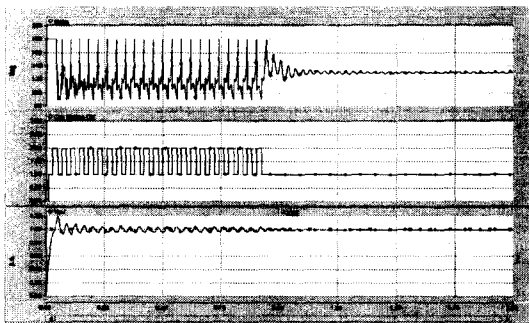


그림 8. 22.9 [kV] 선로의 SVC 동작에 따른 점화각의 변화, 커패시터 뱅크의 동작 및 기준전압과 계통 상전압과의 관계 그래프

Fig. 8. fire-angle variation of SVC operating condition in 22.9 [kV] line, operating variation of capacitor bank, showing reference voltage vs. phase voltage

그림 9는 SVC를 설치하지 않았을 경우와 동일하게 실효치 선간전압인 22.9 [kV]를 실효치 상전압으로 2 [Sec] 동안 측정된 파형 그래프이다. 여기서 SVC를 설치하지 않았을 경우에는 시간이 1 [Sec]일 때까지는 A, B, C상의 실효치 상전압이 불평형한 것이 확연히 관측되었지만 병렬보상기인 SVC의 설치로 인해 불평형이 거의 제거되었음을 그래프로써 확인할 수 있다. 또한, 비상용 단상 철도부하가 제거된 시점(1 [Sec] 이후)부터는 3상 전압이 당연히 평형한

것으로 관측되는 것을 볼 수 있다. 또한 그림 10은 아날로그 미터기의 측정값을 보여준다. 2 [Sec]의 측정값이 0.998379 [PU]로 SVC를 설치하지 않았을 경우의 0.913772 [PU]와 많은 차이를 보이고 있음을 알 수 있다. 이는 SVC가 약 0.085 [PU]의 전압을 보상하고 있음을 의미한다.

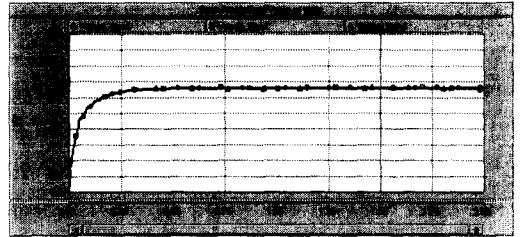


그림 9. SVC를 설치했을 경우의 22.9 [kV] 선로의 실효치 상전압 파형

Fig. 9. RMS phase voltage in 22.9 [kV] line with SVC

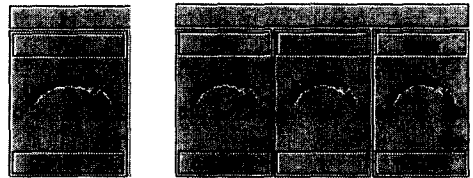


그림 10. PSCAD/EMTDC에서 아날로그 미터기로 측정된 PU 전압값

Fig. 10. Measured PU voltage in PSCAD/EMTDC

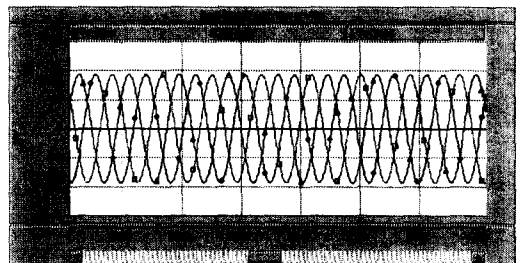


그림 11. SVC가 성치된 경우 22.9 (kV) 선로의 1 [Sec]까지의 상전압 파형

Fig. 11. Each phase voltage in 22.9 [kV] line with SVC during 1 (sec)

그림 11과 12는 22.9 [kV] 선로의 각 실효치 상전압을 나타낸 것이다. 그림 11은 전동차 사무소 일반부하와 비상용 철도부하가 연결되어 있는 1 [Sec]까

지의 전압 파형으로 SVC를 설치하지 않았을 경우에는 그림 6과 같이 각 상의 최대치와 상차각이 어긋남을 볼 수 있었지만, 그림 11과 같이 SVC를 설치한 경우에는 각 상의 최대치가 각각 거의 같음을 눈으로 확인할 수 있다. 그림 12는 1 [Sec] 이후에 3상 평형 일반부하만이 22.9 [kV] 선로에 연결되어 3상이 평형임을 알 수 있다.

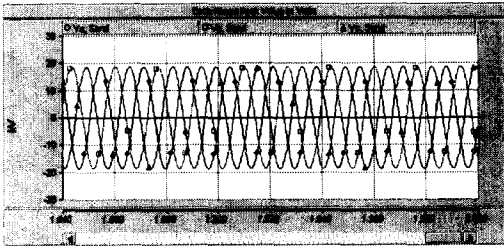


그림 12. SVC를 설치한 경우의 22.9 [kV] 선로의 1 [Sec]부터 2 [Sec]까지의 상전압 파형
Fig. 12. Each phase voltage in 22.9 [kV] line with SVC during 1~2 [Sec]

3.3 전압강하

이번 장에서는 평가할 3가지 항목 중 첫 번째로 전압강하에 대해 PSCAD/EMTDC 시뮬레이션 결과를 이용하여 계산해 보았다. 이 항목에 대한 전압강하율은 식 (4)에 의해서 구할 수 있다 [7].

$$\Delta V = \frac{E_s - E_R}{E_R} \times 100 [\%] \quad (4)$$

각 송전단 선간전압의 실효값이 22.9 [kV]이므로 상전압의 실효값은 13.221 [kV]가 된다. 계산한 전압강하율은 표 1과 같다.

표 1. 각 상의 전압강하율
Table 1. Voltage drop per phase

		Without SVC	With SVC
전압 강하율	A 상	9.3 [%]	-2.3 [%]
	B 상	9.6 [%]	-2.1 [%]
	C 상	15.2 [%]	2.6 [%]

전압강하율을 살펴보면 SVC를 설치하지 않았을

경우보다 SVC를 설치하였을 경우 SVC의 보상으로 인해 전압강하가 모든 상에 대해 ±3 [%] 이내로 나타남을 알 수 있다.

3.4 전압변동

두 번째로 전동차 사무소의 운영으로 인한 한전 측 22.9 [kV]의 전압변동에 대해 SVC 제작사의 성능시험 결과와 PSCAD/EMTDC 시뮬레이션 결과 데이터에 의한 계산 결과를 다음과 같이 비교해 보았다. 전압 변동율은 식 (5)와 같다 [8].

$$\text{전압변동율} [\%] = \frac{E_{R0} - E_R}{E_R} \times 100 [\%] \quad (5)$$

여기서, E_{R0} : 무부하시 수전단 전압

E_R : 전부하시 수전단 전압

제작사의 SVC 성능시험 결과에서 나온 전압변동율 결과는 표 2와 같다.

표 2. SVC 제작사의 성능시험의 전압변동율
Table 2. Voltage regulation of SVC manufacturer's performance

	전압변동율 [%]	
	Without SVC	With SVC
A-B상 간	-1.58	-1.58
B-C상 간	-9.88	-5.03
C-A상 간	-7.75	-4.52

표 3은 PSCAD/EMTDC 시뮬레이션 결과 데이터를 가지고 계산한 전압변동율이다.

표 3. PSCAD/EMTDC 시뮬레이션 결과로부터 계산한 전압변동율
Table 3. Voltage regulation rate using data of PSCAD/EMTDC simulation

		Without SVC	With SVC
전압 변동율	A 상	9.1 [%]	-2.5 [%]
	B 상	10.3 [%]	-1.5 [%]
	C 상	14.6 [%]	2.0 [%]

SVC 제작사가 실시한 성능시험 결과는 선간전압에 대해 전압변동을 계산하였고, 본 논문에서는 상전압을 이용하여 계산하였다. PSCAD/EMTDC 모델링과 실제 계통과는 약간의 차이가 있고 SVC 설계와 SVC 제어기 설계사양, 그리고 변압기의 동작에 따라 나온 값의 차이가 나타나므로 두 결과 값에 차이가 발생하였다. PSCAD/EMTDC 설계시에 변압기는 지원하는 변압기 라이브러리의 디폴트 값을 사용하였다. 하지만, 그러한 점을 고려하더라도 SVC를 설치하였을 경우 전압변동율이 ±3 [%] 이내로 유지됨을 알 수 있다.

3.5 전압불평형

우리나라 전압불평형 규제치는 전기설비기술기준에 의거 전압불평형율이 2시간 평균 3 [%] 이하로 규정되어 있다. 따라서 전압불평형은 다음과 같이 구할 수 있다.

각 A, B, C상 전압을 각각 V_a, V_b, V_c 라고 하면 전압의 정상분 V_1 은 다음과 같다.

$$V_1 = \frac{1}{3}(V_a + aV_b + a^2V_c) \quad (6)$$

또한, 역상 전압은 다음 식 (7)과 같다.

$$V_2 = \frac{1}{3}(V_a + a^2V_b + aV_c) \quad (7)$$

결국, 전압불평형율은 정상분과 역상분의 비율로 표현되므로 $|V_2/V_1|$ 로 구할 수 있다.

SVC 제작사의 성능시험결과 중 전압불평형율의 결과는 SVC를 설치했을 경우 2.25 [%], 그리고 SVC를 설치하지 않았을 경우에 5.38 [%]로 나왔다.

PSCAD/EMTDC 시뮬레이션 결과에 의한 SVC를 설치하지 않았을 경우와 설치했을 경우의 전압불평형율은 아래 표 4와 같다. SVC를 설치하지 않았을 경우에는 우리나라 전압불평형 기준을 위반하고 있으나 SVC를 설치했을 경우는 ±3 [%] 이내로 유지함을 알 수 있다. 그러나 PSCAD/EMTDC 시뮬레이션 결과로 전압불평형율의 2시간 평균을 구할 수는 없

으므로 시뮬레이션 시간 중 즉, 정상상태에 도달했을 경우 가장 큰 값(악조건)으로 이를 대신하였다.

표 4. PSCAD/EMTDC 시뮬레이션 결과로부터 계산한 전압불평형율
Table 4. Unbalanced Voltages rate using data of PSCAD/EMTDC simulation

	Without SVC	With SVC
A 상	12.10 [kV]	13.53 [kV]
B 상	12.06 [kV]	13.50 [kV]
C 상	11.48 [kV]	12.89 [kV]
전압 불평형율[%]	9.8 [%]	2.5 [%]

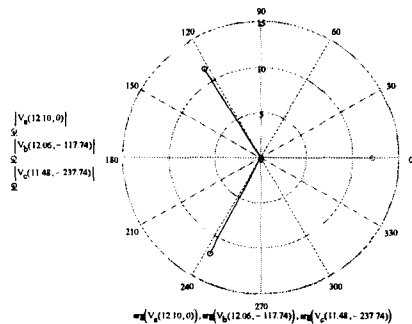


그림 13. SVC를 설치하지 않았을 경우 전압벡터도
Fig. 13. Vector diagram of condition without SVC

그림 13은 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.

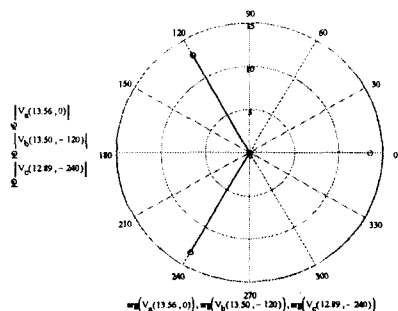


그림 14. SVC를 설치한 경우 전압벡터도
Fig. 14. Vector diagram of condition with SVC

그림 14는 SVC를 설치하여 전압 불평형을 보상 한 경우의 3상 전압 벡터도이다. 그림에서 보는바와 같이 거의 3상 평형임을 알 수 있다.

4. 결 론

본 논문에서는 전동차 사무소의 SVC 적용에 대한 검토를 목적으로 하였다. 또한 3상 진상 커패시터와 SVC의 혼용이 전동차 사무소의 일반부하와 비상용 철도부하에 대해서도 충분한 보상을 하는 것에 대해 검토하였다.

그러나 실제 국내 전기철도 차량기지에 SVC 등과 같은 FACTS 기기를 적용하기 위해서는 기술성뿐만 아니라 경제성과 설치, 유지보수 등 제반 요건을 종합적으로 고려하여야 하고, 전압불평형 및 고조파 등에 대해서도 지속적인 연구가 필요하다 하겠다.

References

- (1) 持永芳文 “自動式 電力變換裝置 による 交流電氣鐵道 電源電壓 變動對策”, RTRI REPORT, Vol. 10, No. 7, pp. 5~10, 1997. 7.
- (2) 常盤幸生 “電力系統用 自動式 SVC의 開發”, 電氣學會論文 113卷, 2號, pp. 168~175, 1993.
- (3) N. G. Hingorani, L. Guugyi, Understanding FACTS, IEEE Press.
- (4) 정현수, 이승혁, 김진오, “단권변압기 교류전기철도 급전시스템의 전차선 전압해석”, 대한전기학회 논문지, Vol. 52A, No. 9, 2003. 9.
- (5) 정현수, 이승혁, 김진오, “STATCOM을 이용한 교류 전기철도 급전시스템의 전압강하 보상”, 한국조명전기설비학회 논문지, Vol. 16, No. 5, pp. 83~89, 2002. 9.
- (6) H. S. Jung, S. H. Lee and 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.
- (7) 長谷伸一 “自動式 電力變換裝置 によるき 電氣鐵道 電源電壓變動對策”, RTRI REPORT, Vol. 10, No. 7, pp. 5~10, 1996. 7.
- (8) 苑索哲天 “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의 開發”, 電氣學會論文 D 115卷, 12號, pp. 1521~1228, 1995. 2.
- (9) EMTDC USER'S GUIDE V.4.02, Manitoba HVDC Research Centre Inc., 2003.

◇저자소개◇

이준경 (李埈敬)

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

이승혁 (李丞赫)

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