

**SVC를 이용한 전기철도
급전시스템에서의 전압강하 보상**

방성원 · 정현수 · 정창호 · 김진오
한양대학교 전기공학과

**Compensation of Voltage Drop Using the SVC in Electric
Railway Power Supply System**

Seong-Won Bang, Hyun-Soo Jung, Chang-Ho Jung, Jin-O Kim
Dept. of Electrical Engineering, Hanyang University, Seoul, KOREA

Abstract - This paper represents the application of the Static Var Compensator (SVC) on the electric railway power supply system to compensate for the voltage drop. The high reactance of line and a heavy train load consume a significant amount of the reactive power which results the voltage drop. This paper shows that the SVC is necessary for voltage compensation in the railway power supply system and verify effectiveness of the SVC through the simulation by using PSCAD/EMTDC. In this paper, the case studies were performed with the various line length and train loads.

1. 서 론

전기철도의 차량부하는 운전시각의 단축, 고속화 및 견인력 확대 등에 의해 계속 증가하는 추세에 있다. 이로 인해 급전선로에서는 보다 많은 전력이 필요하게 되어 전압강하가 발생하게 된다. 이 전압강하는 전기철도의 정상적인 운전을 저해할 뿐만 아니라 3상 전원측에도 전압불평형을 초래하는 원인이 되고 있다. 이의 해결방안으로 지금까지는 전력용 콘덴서를 설치하여 전압보상을 해왔는데 이것은 기계적인 스위칭 방식으로 응답속도가 느리고 과도현상이 발생하는 단점이 있다. 이에 반해 SVC(Static Var Compensator)는 전력용 반도체 소자에 의한 실시간 제어가 가능하기 때문에 외국에서는 이미 전기철도에 적용하거나 적용을 검토하고 있다. 따라서 본 논문에서는 전기철도 급전계통의 전압안정과 무효전력보상 및 전압불평형 방지 수단으로 SVC 적용을 검토하였다. 국내적용을 검토하기 위해 시공중인 경부선 고속철도를 모델링하여 정상급전과 인근변전소 사고로 인한 연장급전의 경우 및 향후 예상되는 운전시각 단축에 따른 차량부하가 증가하는 경우를 모의하여 각각에 대해 SVC 적용을 검토하여 시뮬레이션을 통해 이를 입증하였다.

2. 전기철도 급전시스템 구조

2.1 전력 급전 시스템

전기철도에서 일반적으로 3상을 2상으로 변환하기 위해서 스코트 변압기(Scott Transformer)를 사용한다. 그림 1은 스코트 변압기의 회로도 및 출력 전압을 나타내었다. 3상 전원의 선간전압은 스코트 변압기에 의해서 M상과 T상인 2상으로 그 위상과 크기를 변화되는데 이는 식 (1)과 같이 표현할 수 있다. 식 (1)에서 1차측의 M상과 T상의 전압은 각각 154kV, 133kV이며, 90°의 위상차를 갖는다. 또한 2차측의 각 상의 전압은 90°의 위상차를 갖고 크기는 같다.

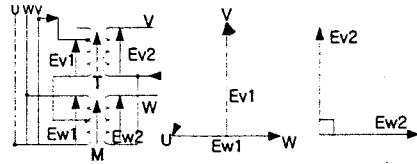


그림 1. Scott 변압기

$$\begin{aligned}
 E_{r1} - \frac{1}{2} E_{w1} &= E_{uv} \\
 -\frac{1}{2} E_{w1} - E_{r1} &= E_{uw} \\
 E_{r1} &= \frac{\sqrt{3}}{2} E_{w1} \\
 E_{r1} &= E_{w1} \angle 90^\circ
 \end{aligned} \tag{1}$$

여기서,

- E_u, E_v, E_w : 전원 전압
- E_{v1}, E_{w1} : Scott 변압기 1차측 전압
- E_{v2}, E_{w2} : Scott 변압기 2차측 전압

2.2 급전시스템 모델과 전기철도의 차량부하

본 논문에서 전차선, 레일, 급전선의 자기 임피던스와 상호임피던스는 참고문헌 [1]의 데이터를 사용하였으며, 이를 표 1에 정리하였다. 급전시스템은 단권변압기(AT: Auto Transformer)가 포함되어 있고, 선로의 임피던스는 단순히 거리에 비례하지 않기 때문에 등가화된 특별한 해석 모델이 필요하다. 그림 2는 전기철도 급전시스템에서 AT의 누설임피던스를 고려하지 않은 각 도체별 등가 임피던스 모델로서 각 구간의 임피던스 Zone, 선로길이 l_n , AT의 거리 D_n , AT와 전기철도 사이의 거리를 X_n 으로 나타내었다. AT의 특성을 포함하여 선로정수를 상수변환하면 식 (2)와 같고, 등가화된 자기임피던스의 형태인 식 (3)으로 변환할 수 있다. 식 (4)와 (5)는 각 구간별 임피던스와 전체 선로의 임피던스를 나타낸 것이다[1][2].

표 1. 전기철도 급전시스템의 선로정수

Impedance Type	Impedance [ohm/km]
Catenary (Z_{aa})	0.194+j0.731
Rail (Z_{bb})	0.099+j0.467
Feeder (Z_{cc})	0.122+j0.587
Catenary-Rail (Z_{ab})	0.058+j0.373
Rail Feeder (Z_{bc})	0.051+j0.360
Feeder-Catenary (Z_{ca})	0.058+j0.369

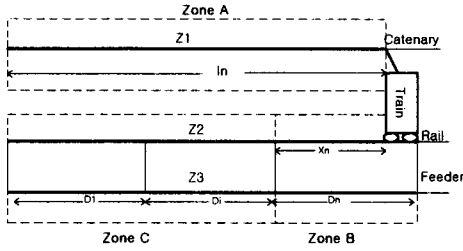


그림 2. 전기철도 급전시스템의 등가모델

$$Z_A = Z_{aa} \quad Z_B = Z_{bb} \quad Z_C = \frac{Z_{cc} + 2Z_{ca} + Z_{aa}}{4} \quad (2)$$

$$Z_{AB} = Z_{ab} \quad Z_{BC} = \frac{(Z_{bc} + Z_{ab})}{2} \quad Z_{CA} = \frac{(Z_{ca} + Z_{aa})}{2}$$

$$Z_1 = Z_A + Z_{BC} - Z_{AB} - Z_{CA} \quad (3)$$

$$Z_2 = Z_B + Z_{CA} - Z_{BC} - Z_{AB}$$

$$Z_3 = Z_C + Z_{AB} - Z_{CA} - Z_{BC}$$

$$Z_{ZA} = Z_1 l_n$$

$$Z_{ZB} = \frac{Z_2 X_n [Z_3 D_n + Z_2 (D_n - X_n)]}{(Z_2 + Z_3) D_n} \quad (4)$$

$$Z_{ZC} = \frac{Z_2 Z_3 (l_n - X_n)}{(Z_2 + Z_3)}$$

여기서,

$$l_n = D_1 + D_2 + \dots + D_{n-1} + X_n$$

$$Z_n = Z_{AB} + Z_{BC} + Z_{CA} \quad (5)$$

전기철도에서 차량은 전차선과 레일 사이에서 운행된다. 보통 차량역률은 0.8~1.0이고, 교류 단상 유도 전동기로서 27.5kV, 60Hz이며 차량 1편성의 최대 부하용량은 15MW이하이다.

2.3 TSC-SVC 시스템

2.3.1 SVC의 구조

전기철도 급전시스템의 선로는 대부분 유도성이며, 전압강하가 발생하는데, SVC는 이러한 전압강하를 보상하는 장치로서 전압 공급의 안정성을 향상시킨다. 이러한 특성을 가진 SVC는 전력 반도체 스위칭 소자를 이용하여 기계적 스위치의 개폐 시에 발생하는 과도현상이 나타나지 않는다.

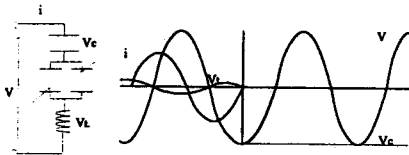


그림 3. SVC 구조와 전압·전류 파형

그림 3에서 TSC-SVC는 콘덴서, 싸이리스터, 서지보호용 리액터로 구성되며, 싸이리스터를 보호하기 위한 리액터는 서지 전류를 제한시킨다. 정상상태에서 SVC는 정현파 교류 전압 ($V = V_m \sin \omega t$)이 인가되며, SVC에 흐르는 전류는 식 (6)과 같다.

$$i(\omega t) = V \frac{n^2}{n^2 - 1} \omega C \cos \omega t \quad (6)$$

여기서,

$$n = \frac{1}{\sqrt{\omega^2 LC}} = \sqrt{\frac{X_C}{X_L}}$$

콘덴서에 충전되는 전압의 크기 V_C 는 식 (7)과 같다.

$$V_C = \frac{n^2}{n^2 - 1} V \quad (7)$$

SVC의 콘덴서가 충전된 상태에서 싸이리스터가 off되고, 재투입이 될 때 스위칭시의 과도현상이 없어진다 [3][4].

2.3.2 SVC가 설치된 전기철도 급전시스템

SVC는 기존의 보상장치에 비해서 폭넓은 교류 전압을 보상할 수 있다는 장점이 있다. 그림 4는 전압강하 ΔV 를 보상 전·후의 차량전압 V_L 과 선로전류 I_S 의 관계를 벡터도로 표현한 것이다. 전기철도 급전시스템에서 전압강하가 발생하면 SVC는 크기가 다른 보상전류 I_C^* 나 I_C^{**} 로 보상전압의 크기를 제어한다.

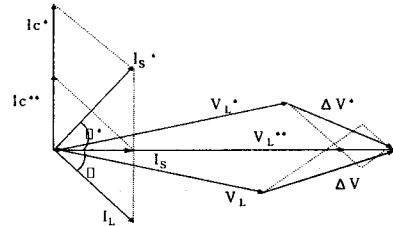


그림 4. 전압강하 보상 벡터도

식 (8)은 선로전류 I_S 를 전기철도의 부하전류 I_L 과 보상전류 I_C 의 관계로 나타낸 것이다.

$$I_S = I_L + I_C \quad (8)$$

차량전압 V_L 은 AT의 전압 V_S 와 선로임피던스(R_L, X_L)에 의한 전압강하 ΔV 의 차이인 식 (9)와 같다.

$$V_L = V_S - (I_S R_L + j I_S X_L) \quad (9)$$

$$= V_S - \Delta V$$

3. 사례 연구

전기철도 급전시스템에 SVC 적용의 사례연구를 위해서 다음과 같이 가정하였다.

- 1) 전기철도 급전시스템은 정상상태이다.
- 2) 전기철도의 차량부하는 일정하다.
- 3) AT 변압기 임피던스 및 차량 무효전력은 무시한다.

사례연구는 PSCAD/EMTDC를 이용하였으며, 전기철도의 차량부하를 정상급전인 경우와 인근변전소 사고로 인한 연장급전 및 운전시격 단축으로 인한 중대부하 급전인 경우를 표 2과 같이 고려하였다. 그림 5는 급전시스템에서 전압강하가 큰 급전구분소(SP : Sectioning Post)에 SVC를 설치한 경우이다. SVC의 용량은 5kV/20MVA이며, 보상효과를 검토하기 위해서 동일한 조건에서 보상전과 후를 비교하였다. 사례 1은 정상급전의 경우이고 사례 2는 변전소 고장으로 인해 인근 변전

소에서 전압을 공급하는 연장급전의 경우이다.

표 2. 사례별 급전거리 및 부하용량표

사례	주변압기 M=T의 급전거리(KM)	차량부하용량(MW) (1시간실효치)	
		5분시격	4분시격
사례1/정상급전	25	25	30
사례2/연장급전	50	49	60
사례3/증대부하급전	25/50	-	30/60

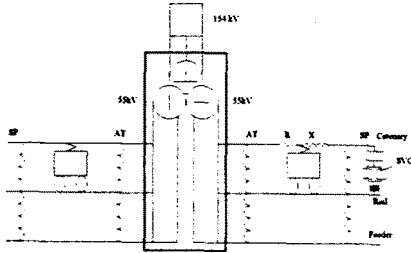


그림 5. 전기철도 급전시스템에 SVC 적용

사례 1: 정상급전의 경우

(선로의 길이 = 25km, 차량부하용량 25 MW)

그림 6은 급전 시스템의 AT 전압 V_s 와 SVC의 설치점에서 차량전압 V_L 을 나타내었다. 이 경우는 선로 길이가 짧고, 차량부하용량이 작아서 전압강하로 인한 문제가 거의 발생하지 않는다. 따라서, SVC를 꼭 설치할 필요는 없다.

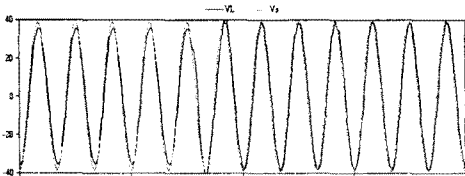


그림 6. 정상급전인 경우 전압강하 보상 전후

사례 2: 연장급전의 경우

(선로의 길이 = 50km, 차량부하용량 49 MW)

사례 2는 정상급전의 경우보다 선로의 길이와 차량부하가 모두 두배가 된 상태이다. 그림 7에서 선로 전압은 보상전에 비해 약 11%정도가 증가된 22.5kV를 나타냈다. 그림 7에서 전압 왜곡은 SVC의 콘덴서가 완전히 충전되지 않은 상태에서 싸이리스터가 스위칭 되었기 때문에 발생하였다.

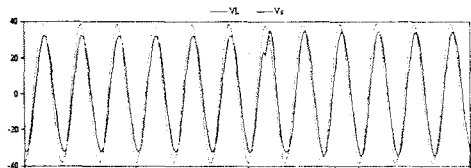


그림 7. 연장급전인 경우 전압강하 보상 전후

그림 8은 사례 1과 2를 종합적으로 분석한 것으로서 급전 거리와 차량부하의 증가에 따른 전압강하 보상관계를 나타내었다. 정상급전의 경우보다 연장급전일 때 선로길이가 길어지고, 선로에 운행하는 차량의 수가 증대되어서 상대적으로 큰 전압강하가 발생하였다. 최대 전압강하는 변전소로부터 가장 먼 연장 급전선로 말단에서 발생 되었으며, 선로 말단의 최저 전압은 약 21kV이며,

SVC에 의해서 약 2kV정도 보상됨을 알 수 있다.

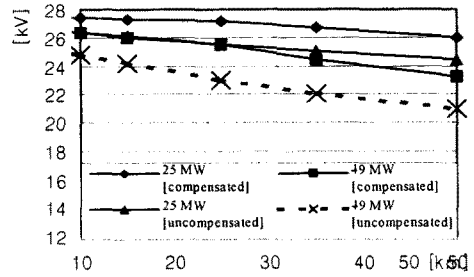


그림 8. 5분시격 운행시의 전압강하 보상 전후

사례 3 : 증대부하급전인 경우

(선로길이 = 25/50km, 차량부하용량 30/60 MW)
 사례 3은 동일한 선로 상태에서 운전시격을 5분에서 4분으로 단축시켰을 경우이다. 그림 9에서 차량부하용량이 60MW로 증가함에 따라 선로 말단의 전압은 19.4kV로 더 낮아졌다. 이때 SVC에 의하여 선로 말단의 전압이 22.5kV까지 보상이 되어 SVC의 설치 효과가 더 크게 나타났다.

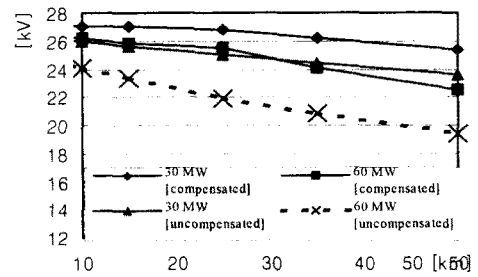


그림 9. 4분시격 운행시의 전압강하 보상 전후

4. 결론

본 논문에서는 전기철도 급전시스템에 용량 20MVA의 SVC를 SP에 설치하였을 경우의 효과에 대해 검토하였다. 급전계통에 SVC를 적용하면, 1) 기존 전력용 콘덴서에 비해 실시간 제어로 응답 특성이 좋고, 2) 전기철도 운행선 구간에 변전소 사고나 운행시격 단축 등으로 인해 차량 부하증대시 변전소 Scott 변압기를 교체하지 않고도 필요한 위치에 SVC를 설치하면, 전압강하 개선은 물론 연장 급전시의 차량부하 편중으로 인한 3상 전원전압 불평형 해소에도 많은 효과가 있음을 알 수 있었다. 본 논문에서는 TSC 방식의 SVC만을 고려하였지만 TSC-TCR의 SVC를 적용할 경우 더욱 효과가 있을 것으로 예상된다.

(참 고 문 헌)

- [1] 신형섭, 다중열차 운영을 고려한 전기철도 급전계통 시뮬레이션, 한국고속철도 건설공단, pp. 20-35, 1996.
- [2] R. J. Hill, D. C. Carpenter and T. Tasar, "Railway track admittance, earth-leakage effects and track circuit operation", *Proceedings of Joint ASME/IEEE railroad Conf.*, pp. 55-62, April 26-28, 1989.
- [3] Jefferson D. Bronfeld, "Utility Application of Static VAR Compensation", *IEEE Southern Tier Technical Conference*, pp. 53-63, 1987.
- [4] G. Narain, *Underatanding FACTS*, IEEE Press, pp. 151-156, 2000.