

전기철도 급전시스템에서 전력품질 향상에 관한 연구

방성원 · 이승혁 · 정현수 · 정창호 · 김진오
한양대학교 전기공학과

A Study on Power-Quality Improvement
in Electric Railway Power Supply System

Seong-Won Bang, Seung-Hyuk Lee, 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. The purpose of the electric equipment can be summarized as to improve electrical power quality and to maintain the voltage. 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. In this paper, the case studies were performed with the various line length and train position.

1. 서 론

전기철도 차량부하는 짧은 운행시격, 고속화 및 출력의 대형화 등에 의해 계속 증가하고 있다. 이로 인해 급전선로에서는 보다 많은 전력이 필요하게 되어 전압강하가 발생하게 된다. 이것은 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.

본 논문에서는 전기철도 급전시스템의 전차선, 레일, 급전선과 SVC, AT 변압기 등을 모델링하여 각각의 전압 프로파일로 나타내었으며, 이를 토대로 보상효과를 해석하였다.

2. 전기철도 급전시스템

2.1 전철 변전소

일반적으로 3상을 2상으로 변환하기 위해서 스코트 변압기(Scott Transformer)를 사용한다. 표1은 교류 방식의 송전 계통을 나타낸다. 3상 전원의 선간전압은 스코트 변압기에 의해서 M상과 T상인 2상으로 그 위상과 크기를 변화된다. 1차측의 M상과 T상의 전압은 각각 154kV, 133kV이며, 90°의 위상차를 갖는다. 또한, 2차측의 각 상의 전압은 55kV이며, 90°의 위상차를 갖고 크기는 같다.

표 1. 교류 방식의 송전계통

AT 방식	발전소 (345kV)	변전소 (154kV)	전철 변전소 (55kV)
-------	-------------	-------------	---------------

2.2 급전시스템 모델

급전시스템의 선로정수(임피던스)는 선로의 재료, 기학적 배치, 접지 용량에 의해 결정된다. 본 논문에서 전차선, 레일, 급전선의 자기 임피던스와 상호임피던스는 참고문헌[1]의 데이터를 사용하였으며, 이를 표 2에 정리하였다. 단권변압기(AT: Auto Transformer) 급전방식은 대용량 차량 부하에서도 전압강하와 전압 불평형이 적어 안정된 전력공급가능하며, 레일에 흐르는 전류는 차량을 중심으로 각각 반대 방향으로 AT쪽으로 흐르기 때문에 근접한 통신선에 대한 유도 장애도 적게 되는 장점이 있다.

표 2. 전기철도 급전시스템의 선로정수

Impedance Type	Impedance (ohm/km)
Catenary (Z_{cc})	0.194+j0.731
Rail (Z_{rr})	0.099+j0.467
Feeder (Z_{ff})	0.122+j0.587
Catenary-Rail (Z_{cr})	0.058+j0.373
Rail-Feeder (Z_{rf})	0.051+j0.360
Feeder-Catenary (Z_{cf})	0.058+j0.369

2.3 급전시스템 모델링

단권변압기는 변전소에서 급전선로를 선로에 따라 가선하여 급전선과 전차선 사이에 약 10(km)간격으로 AT를 병렬로 설치하여 변압기 권선의 중성점을 레일에 접속하는 방식이다. 단권 변압기(AT)의 구조는 전차선과 급전선에 연결이 되었고, 중성점은 레일에 연결이 되었다. AT는 전차선과 급전선 사이에 55kV를 공급받는 1:1의 비율을 갖고, 전차선과 레일 사이에 27.5kV의 전압을 공급해준다. 이상적인 AT급전 시스템에서 전류는 AT 변압기의 특성상 양쪽으로 분배되어 흐른다. 즉, AT가 1:1의 비율을 갖기 때문에 공급되는 전류의 절반은 AT섹션과 차량사이에서 순환하는 전류이고, 나머지 절반은 전철변전소로 귀환하는 전류이다. 여기서, AT 변압기는 무한대의 자화 인덕턴스와 무손실을 갖는 이상적이며, 선로, 지면, 보호선은 서로간에 상호 어드미턴스와 레일의 누설전류를 무시한다[2].

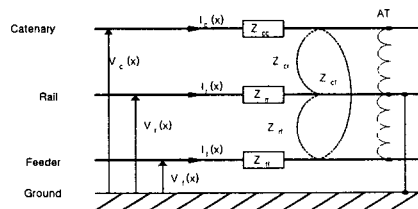


그림 1. AT 급전시스템에서 전압과 전류

그림 1은 자기·상호임피던스를 고려한 전차선과 레일, 급전선의 전압과 전류를 나타낸다. 식 (1)에 의해서 전차선과 레일, 피더의 전압을 구한다. 같은 지점에서 전차선과 레일의 전압 차이는 차량전압이 된다. 전차선과 레일의 전압 프로파일은 차량이 움직일 때마다 변한다.

$$\begin{aligned} V_c(x) - V_c(0) &= -(Z_{cc}I_c + Z_{cr}I_r + Z_{cf}I_f)x \\ V_r(x) - V_r(0) &= -(Z_{rc}I_c + Z_{rr}I_r + Z_{rf}I_f)x \\ V_f(x) - V_f(0) &= -(Z_{fc}I_c + Z_{fr}I_r + Z_{ff}I_f)x \end{aligned} \quad (1)$$

V_c, V_r, V_f : 전차선, 레일, 급전선 전압
 I_c, I_r, I_f : 전차선, 레일, 급전선 전류
 Z_{cc}, Z_{rr}, Z_{ff} : 자기 임피던스(self-impedance)
 Z_{cf}, Z_{cr}, Z_{rf} : 상호 임피던스(mutual-impedance)
 x : 전철변전소로부터 측정 위치

2.3 차량부하의 모델링

급전시스템에서 차량부하는 전차선과 레일 사이를 운행하는 정전류(constant current)로 간주한다. 표 3은 차량제원을 나타낸다. 보통 차량역률은 0.8~1.0이고, 교류 단상 유도전동기로서 25kV, 60Hz이며 차량 1편성의 최대 부하 용량은 15MW 이하이다.

표 3. 전기철도 차량제원

항 목		내 용
차량	사용전압	25 kV, 60Hz AC
	견인동력	13560 kW
동력	전기제동력	300 kN
	안정한도 속도	330 km/h
차량	최대운용속도	300 km/h
	가속성능	6 분 50 초
제동방식		회생 + 발전 + 공기제동

2.4 Static Var Compensator (SVC)

전기철도 급전시스템의 선로는 대부분 유도성이며, 전압강하가 발생하는데, SVC는 이러한 전압강하를 보상하는 장치로서 전압 공급의 안정성을 향상시킨다. 이러한 특성을 가진 SVC는 전력 반도체 스위칭 소자가 이용하여 기계적 스위치의 개폐 시에 발생하는 과도현상이 나타나지 않는다. SVC는 기존의 보상장치에 비해서 폭넓은 교류 전압을 보상할수 있다는 장점이 있다.

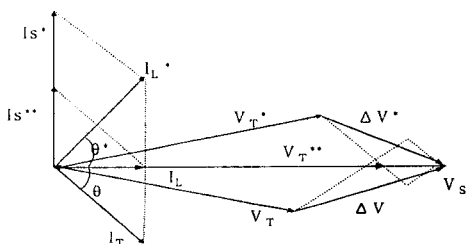


그림 2. 전압강하 보상 벡터도

그림 2는 전압강하 ΔV 를 보상 전·후의 차량전압 V_T 와 선로전류 I_L 의 관계를 벡터도로 표현한 것이다. 전기철도 급전시스템에서 전압강하가 발생하면 SVC는 크기가 다른 보상전류 I_s^* 나 I_s^{**} 로 보상전압의 크기를 제어한다. SVC 제원은 표 4와 같다.

표 4. Static Var Compensator 제원

항 목	내 용
상	Single phase
주파수	60Hz
정격전압	25 kV, AC
정격용량	20/10/10 MVA
캐패시터 용량	10 MVA
스위칭제어	Thyristor

식 (2)는 선로전류 I_L 을 전기철도의 차량전류 I_T 과 보상전류 I_s 의 관계로 나타낸 것이다.

$$I_L = I_T + I_s \quad (2)$$

차량전압 V_T 은 AT의 전압 V_s 와 선로임피던스(R_l, X_l)에 의한 전압강하 ΔV 의 차이인 식 (3)와 같다.

$$\begin{aligned} V_T &= V_s - (I_L R_l + jI_L X_l) \\ &= V_s - \Delta V \end{aligned} \quad (3)$$

3. 사례 연구

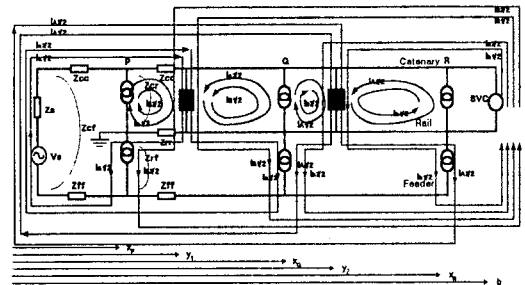


그림 3. AT 급전시스템의 등가회로

그림 3은 정상급전의 경우일 때 AT 급전시스템의 등가회로에 전류 분배를 나타내었다. 각 섹션마다 차량(정전류원)이 있을 경우이며, 전철변전소로부터 AT 변압기, 차량, SVC의 위치는 x, y, b 이다. AT 급전시스템에서 전차선, 레일의 전압은 식 (1)과 같은 수식으로 표현할 수 있다. 사례연구는 각각 정상 급전과 연장급전인 경우에 차량부하가 정전류원(constant current)일 때 전차선과 레일과의 전압프로파일을 해석하였다.

3.1 정상급전 전압프로파일

차량이 운행됨에 따라 운전되는 차량의 수, 위치, 차량의 부하 등은 시간에 따라 변한다. 하지만, 차량의 부하를 최대로 하기 위해서 차량운행특성을 전구간에 걸쳐 최대의 견인력을 가진다고 가정한다. 등속도로 운행할 경우에 최대의 차량전류($\approx 600A$)가 흐르고, 차량의 역률도 1에 근접한다. 또한, 같은 지점에서 전차선과 레일의 전압차를 이용하여 차량의 전압을 구할 수 있다. AT 변압기를 등간격(13, 24km)으로 배치하였으며, 차량은

AT 섹션마다 각각 한 대씩 운행하고, 전철변전소로부터 11, 22 km 떨어진 경우이다.

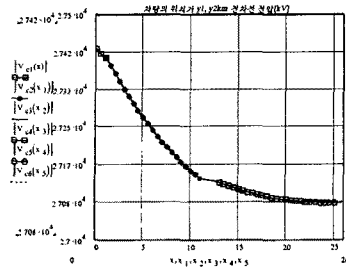


그림 4. 전차선 전압 프로파일

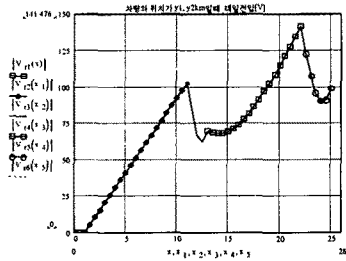


그림 5. 레일 전압 프로파일

그림 4.5은 차량이 섹션마다 11, 22km 지점에 있을 경우의 전차선과 레일의 전압프로파일이다. 전철 변압기의 내부 임피던스때문에 전차선의 초기전압은 정격전압보다 낮은 27.42kV이다. 첫 번째 차량이 있는 지점까지의 전압강하는 두 번째 차량의 전압강하보다 크다. 레일전압은 AT 변압기 주변에서 아래로 볼록한 레일 전압은 AT 변압기의 영향 때문이다.

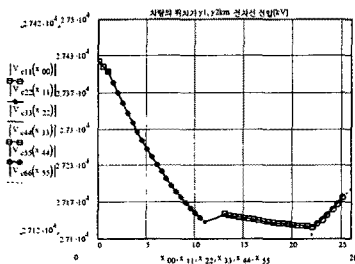


그림 5. 전차선 전압 프로파일

그림 5는 동일한 조건에서 SVC가 동작하여 보상 전류가 흐르는 전차선의 전압프로파일이다. 보상 전과 비교할 때 전차선 전압이 상승되었다. 전차선 전압은 차량에서 AT 변압기로 근접할수록 전압이 상승하는데, 보상 전류가 흘러서 AT 변압기의 특성을 향상시켰기 때문이다.

3.2 연장급전 전압프로파일

인근 변전소의 고장으로 인해 연장급전하는 경우로서 선로의 길이가 정상급전의 두배가 된다. 그림 6,7은 각각 보상 전·후의 전차선 전압프로파일이다. 보상 전은 정상급전과 같은 형태의 전압강하를 나타내며, 보상 후는 SVC가 설치된 중간지점에서 SVC를 기준으로 대칭적인 전압 분포를 갖으며, 보상 효과가 잘 나타나고 있다. 보상 후에 선로 말단의 전압강하가 개선되었다.

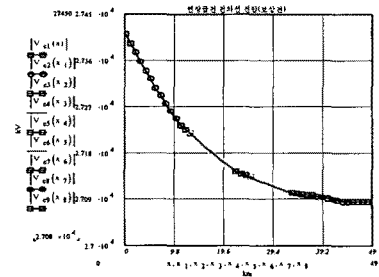


그림 6. 전차선 전압 프로파일(보상전)

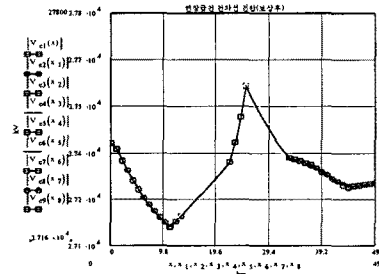


그림 7. 전차선 전압 프로파일(보상후)

4. 결론

본 논문에서는 전기철도 급전시스템에서 전차선과 레일 전압을 프로파일로 나타내었고, 귀환전류와 순환전류를 모두 이용하여 AT 변압기의 특성을 적절하게 구현하였다. 전기철도 급전시스템에 용량 20MVA의 SVC를 설치하였을 경우의 효과에 전압 프로파일을 이용하여 해석하였다. 특히, 전압강하가 큰 급전구분소(SP : Sectioning Post)에 SVC를 설치함을 통해서 급전시스템의 말단의 전압강하를 개선하였다. 급전시스템에 SVC를 적용하면, 기존 전력용 콘덴서에 비해 실시간 제어로 응답 특성이 좋고, 전기철도 운행선 구간에 변전소 사고나 운행시격 단축 등으로 인해 차량 부하 증대시 변전소 Scott 변압기를 교체하지 않고도 필요한 위치에 SVC를 설치하면, 전압강하 개선은 물론 연장급전의 차량부하 편중으로 인한 3상 전원전압 불평형 해소에도 많은 효과가 예상된다. 앞으로 고장시에 정상운행, 운전시격의 단축이나 차량부하의 대형화 등의 추세를 볼 때 보상기의 필요성을 더욱 대두되고 있다.

(참 고 문 헌)

- [1] 신형섭, 다중열차 운행을 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] 방성원, "전기철도 급전시스템에서 SVC를 이용한 전압강하 보상", 대한전기학회 하계학술대회, pp. 289-291, 2001.