도시철도차량의 운행 선로환경 및 공간적 분포에 따른 공급전압 동특성 변화

A Study on Variation of the Dynamic Characteristic of Supply Voltage According to the Track Environment and Spatial Distribution as Driving of Urban Transits

김 양 수* · 장 진 영** · 이 기 식*** · 구 경 완§ · 김 재 문†
(Yang-Su Kim · Chin-Young Chang · Ki-Sik Lee · Kyung-Wan Koo · Jae-Moon Kim)

Abstract - It is important to consider supply voltage stability in case of design and construction of a substation at electric railway because a urban transit is operated by electricity and it is driven simultaneous in the same section. This paper study on variation of the dynamic characteristic of supply voltage according to the track environment and spatial distribution as driving of urban transits. Simulation tool, TOM(Train Operations Model) software is used to ensure stability of feeder system being used around the world. As results of simulation, voltage of the contact wire is in limits on driving operation diagram of urban transits. Also, it has confirmed that there is a correlation the phase current, depending on the speed of urban transit and track environment like vertical gradients and curve radius.

Key Words : Urban transit, TOM, Track environment, Contact wire, Driving operation diagram

1. 서 론

우리나라는 경부선 고속철도 운행과 호남선 고속철도 건설을 계기로 전기를 에너지원으로 하는 전기철도차량 수요가 증대되고 있다. 이에 따라 전철 급전계통도 신설 및 확충해 나가고 있으며, 열차운행 계획에 따른 전체 전력 소비량 예측도 주요사항으로 대두되고 있다.

열차 운행에 따른 전철변전소에서 부하로 공급하는 전력을 산출하기 위해 기존에는 한 편성의 철도차량에 대한 평균 전력에 전철변전소 공급거리와 철도차량의 운행밀도를 곱하는 근사적인 방법을 사용해왔으나 유럽 및 일본을 비롯한 선진 철도국에서는 오래 전부터 급전 시뮬레이션 소프트웨어를 개발하여 실무에 적용하고 있다. 현재 국내에서도 철도 전문 연구출연기관에서 자체 개발한 급전 시뮬레이션 프로그램을 활용하여 실무에 적용하고 있으나, 사용에 따른 저변확대 미흡 및 관련업체 사용에 제한적 요소가 존재하는 실정이다[1].

급전 시뮬레이션에 따른 결과물은 급전 설비의 용량 결정뿐만 아니라 기존 전기철도 시스템에서 철도차량의 운행 계획을 변경할 때에 그에 따른 전체 전력 소비량의 변화를 예측하고 급전계통 측면에서 공급이 가능한지를 검토하는 데에도 사용된다. 특히 급전 계통의 설계에 있어서 철도차량

의 주행 성능과 관련하여 상세히 검토되고 있는 항목은 급전계통의 전압강하이다. 철도차량이 주행하는 데에 충분한 견인성능을 보장하기 위하여 팬터그래프인 집전장치와 직접 접촉하는 전차선의 전압이 적정하게 유지되어야 한다. 그러나 여러 편성의 철도차량이 동일 구간을 운행하는 상황에서는 전압 변동이 심하게 나타나기 때문에 급전 시뮬레이션을 통해 전철 변전소의 위치 선정 타당성 및 설비용량, 급전선로의 용량 등을 설계 시에 반영해야 한다. 또한 철도차량 운행 계획의 변경 시에도 급전계통 측면에서 전력 수요가 용량 범위 내에 있는지 여부와 전차선 전압이 관련법에 만족하는 적정범위 유지가 가능한지 검토해야 한다[1-3].

본 논문에서는 도시철도차량을 운행하는데 있어 전철변전소의 급전계통에 나타나는 현상을 정확히 파악하기 위해 전차선로 정수 등 급전계통의 전기적인 특성 이외에도 철도차량의 주행 특성 및 전력 소비 패턴, 열차 운행 계획에 따른 열차의 공간적 분포, 선로의 구배 및 곡선반경 등 종합적인 시스템에 대한 해석을 하였다. 이에 따른 도시철도차량 운행밀도에 따른 급전전압 및 전류 등 침두시와 비침두시 전력 동특성을 분석하여 급전 시스템의 공급전압 안정성을 확인하였다.

2. 급전계통 및 주요 시스템 요소

전기철도 급전계통에 대한 시뮬레이션을 위해서는 우선, 검토 대상 선로에 투입될 도시철도차량의 편성, 성능 및 운행 시격을 설정한다. 그리고 선로환경에 따른 구배, 곡선, 선로임피던스 데이터를 삽입하여 주행 시뮬레이션을 수행하면 운행 구간 내에서 시각별 위치, 속도, 전력소비량 등 순시적으로 계산된다. 따라서 도시철도차량의 운행 계획에 따라 배열하면 매 순간마다 도시철도차량의 위치 및 소비전력이

* 정 회 원 : 한국교통대 철도전기전자공학과 교수

** 정 회 원 : 중앙대 전자전기공학부 박사과정

*** 시니어회원 : 단국대 전자전기공학부 교수

§ 정 회 원 : 호서대 국방과학기술학과 부교수

† 교신저자, 정회원 : 한국교통대 철도전기전자공학과 부교수

E-mail : goldmoon@ut.ac.kr

접수일자 : 2012년 7월 10일

최종완료 : 2012년 7월 31일

결정되므로 이를 추출하여 각 변전소마다 공급 구간 내에 있는 철도차량의 소비전력을 합산하여 전철변전소 부하를 계산할 수 있고 주행되는 도시철도차량 위치에서의 공급전압이 계산된다.

2.1 급전계통의 운행노선 및 주요 요소

본 논문에서는 신분당선 용산~광교 사이의 포이 전철변전소를 기준으로 시뮬레이션을 수행하였으며, 급전계통 입력자료는 “신분당선 용산~강남 전철건설 기본계획보고서(안)” 데이터를 활용하였다. 그림 1은 6량 1편성 도시철도차량의 운행에 따른 급전계통도를 보여준다. 전철변전소(S/S)를 기점으로 T상은 정상 급전시 가상ATP까지 12.265km를 공급하고, M상은 가상 ATP까지 28.735km에 걸친 전력을 공급한다. 그리고 급전계통상에 급전구분소(SP)와 보조급전구분소(SSP)를 두어 전차선 사고시 혹은 작업시 정전구간을 단축하도록 급전계통을 구분하고 있다[4].

그림 1 급전 계통의 개략도

Fig. 1 Outline diagram of feeding system

한편 계통전원에는 전압강하 등을 고려하여 국내 전철계통에서 대부분 스코트(Scott) 결선 변압기를 사용하고 있다. 그림 2는 시뮬레이션을 위한 스코트 변압기의 모델링 구현을 보여주고 있으며 상용 전원계통 3상에서 단상을 얻기 위하여 단상변압기 2대를 T결선하여 상차각 90°인 단상 2회전을 공급하도록 만든 변압기이다. T상이 M상 권선의 중앙점에 결선되어 있으므로 T상의 전류가 M상 중앙점에서 M상 좌우 양쪽 권선에 각각 균등히 흐르게 되어 M상 철심에는 서로 암페어-턴 수가 같고 방향이 반대인 자속이 발생하여 자속이 서로 상쇄되므로 M상 변압기 임피던스는 T상 변압기 전류 흐름에 영향을 미치지 않게 된다. 따라서 T상 변압기 임피던스와 M상 변압기 임피던스가 같게 되면 T상과 M상의 변압기의 전압강하도 같게 된다.

그림 2 스코트 변압기 모델링

Fig. 2 Modeling of scott transformer in railway power system

한편 전차선로를 비롯한 계통 임피던스를 표 1과 표 2에서 보여준다. 전차선로 정수는 자기 임피던스와 상호 임피던스로 나누어 고려될 수 있다. 자기 임피던스 Z 는 가선의 지표상 높이와 대지 도전을 등에 따라 변화하는 외부 임피던스 Z_s 와 전선 고유의 내부 임피던스 Z_i 의 합으로 구해지며, 식 (1)과 같이 된다[5].

$$Z = Z_s + Z_i \quad [\Omega/\text{km}] \quad (1)$$

$$Z = R + w \left(\frac{\pi}{2} - \frac{4x}{3\sqrt{2}} \right) \times 10^{-4} + jwL + \left(2\log \frac{4h}{\gamma x} + \frac{4x}{3\sqrt{2}} - 0.1544 \right) \times 10^{-4} \quad (2)$$

여기서, R 은 선로저항 $[\Omega]$, $x = 4\pi h \sqrt{2\sigma f} \times 10^{-4}$, L 은 인덕턴스 $[\text{H}]$, h 는 전선 높이 $[\text{cm}]$, $\gamma = 1.781$ (Bessel의 정수), $w = 2\pi f$

또한 상호 임피던스 Z_M $[\Omega/\text{km}]$ 는 지표상 높이가 h_1, h_2 $[\text{cm}]$ 이고 수평거리가 b $[\text{cm}]$ 인 두 전선간의 상호 임피던스로 Carson-Pollaczek의 공식을 이용하여 계산한다.

$$Z_M = w \frac{\pi}{2} - \frac{4x'}{3\sqrt{2}} (h_1 + h_2) \times 10^{-4} + jw 2\log \frac{2}{\gamma x' \sqrt{b^2 + (h_1 - h_2)^2}} + \frac{4x'}{3\sqrt{2}} (h_1 + h_2) + 1 \times 10^{-4} \quad (3)$$

여기서, h_1, h_2 는 전선 1, 2의 지표면에서의 높이 $[\text{m}]$, b 는 전선1, 2의 수평거리 $[\text{m}]$, $x' = 2\pi \sqrt{2\sigma f} \times 10^{-4}$, σ 는 대지도전율 $(0.1 \sim 0.001)[\text{S}/\text{m}]$, $x = 4\pi h \sqrt{2\sigma f} \times 10^{-4}$, $\gamma = 1.781$ (Bessel의 정수), $w = 2\pi f$

표 1 전차선로 임피던스 데이터

Table 1 Impedance Data of Catenary System

자기 임피던스 [Ω/km]	전차선	0.1755+j0.7376
	레 일	0.1738+j0.6215
	급전선	0.1169+j0.6321
상호 임피던스 [Ω/km]	전차선~레일	0.0586+j0.3821
	전차선~급전선	0.1168+j0.5927
	레일~급전선	0.0585+j0.3809

표 2 계통 임피던스 데이터

Table 2 Impedance data in power system including feeder

계통명	임피던스	기준용량 [MVA]	비 고
154kV 변전소	$\%Z_1 = 0.1210 + j1.5100$ $\%Z_0 = 0.7020 + j3.8320$	100	
수전선로	$\%Z_1 = 0.1106 + j0.5203$ $\%Z_0 = 0.1784 + j0.4813$	100	계통S/S ~ 전철S/S
전철S/S	$\%Z_r = 1.9320 + j44.4022$	100	MTr 용량 : 45/60[MVA]
단권 변압기	$Z_{AT} = 0.030 + j0.4490[\Omega]$	5	AT용량 : 5[MVA]

2.2 도시철도차량 제원 및 선로환경

표 3은 전철 급전계통을 운행하는 6량 1편성인 도시철도 차량의 제원을 보여준다. 3M3T인 6량 1편성은 최대 견인력이 106[KN]이고 전기 제동력 88.5[KN]으로 가속도에 비해 감속도가 $0.97[m/s^2]$ 로 크며 이는 제동력이 빠르게 수렴됨을 의미한다. 열차운행 여건에 따라 1편성당 차량 4량, 6량, 8량 등으로 나눌 수 있는데, 본 철도노선에서는 6량 1편성이 기본이다. 승차인원 및 차종별 중량에 따라 철도차량에 유입되는 전류가 변하게 되며, 편성별 철도차량 데이터를 통해 가·감속도 뿐만 아니라 견인력, 제동력 등에 영향을 준다.

표 3 도시철도차량 제원

Table 3 Parameters of an Urban Transit

구 분	단 위	EMU
1편성당 차량수	[량]	6
중량(만차)	[ton]	337.5
MT비	-	3M3T
최고운행속도	[km/h]	120
전동기 용량	[kW]	220
보조동력	[kW]	120
최대 견인력	[KN]	106
전기 제동력	[KN]	88.5
가속도	$[m/s^2]$	0.83
감속도	$[m/s^2]$	0.97

그림 3 도시철도차량의 견인력 및 전기제동력 곡선

Fig. 3 Electric Braking Curve and Powering of Urban transit

그림 4 운행거리에 따른 상·하 구배 특성

Fig. 4 Vertical gradient on driving line of urban transit

그림 3은 표 3의 도시철도차량에 대한 속도별 견인력과 전기제동력 곡선을 보여준다. 36km/h까지 최대 견인력을 내며 이후 속도가 증가할수록 견인력은 감소하여 19[KN]까지 떨어진다. 전기 제동력은 60km/h까지 최대 회생제동력인 88.5[KN]까지 유지하다가 이후 견인력과 같은 형태로 감소하고 있음을 볼 수 있다. 그림 4는 선로환경에 대한 구배조건으로 -30% ~ 30% 범위내에서 상하구배가 존재함을 볼 수 있는데, 이는 도시철도차량의 견인력 등에 영향을 준다. 그림 5는 운행거리에 따른 곡선반경을 보이고 있으며, 대부분 500R[m]이내이지만 시발점 기준으로 26[km]인 지점에서는 50,000R[m]이다.

그림 5 운행거리에 따른 곡선반경

Fig. 5 Curve radius on driving line of urban transit

3. 시뮬레이션

본 논문에서는 상기에서 언급한 선로조건에서 도시철도차량 6량 1편성을 운행하는 경우 승객수요가 많은 출퇴근 시간대인 첨두시를 최소 4.3분 시격과 비첨두시 8분 시격으로 운행한다고 가정하고 시발점과 종착역간 기준으로 시뮬레이션을 하였다.

그림 6 첨두시 도시철도차량 운전 다이어그램

Fig. 6 The driving operation diagram of urban transit during peak time

그림 6은 침두시 4.3분 시격으로 도시철도차량을 운행하였을 때의 운전 다이아를 보여준다. 시발점을 기준으로 17.5km 이후 운전 다이아가 밀집되는 것은 타 노선을 운행하는 도시철도차량이 동일 노선을 운행한다는 것을 의미한다. 그림 7은 운행거리에 따른 도시철도차량의 속도 특성을 보여준다. (a)는 시발역에서 종착역 방향이고 (b)는 종착역에서 시발역으로 운행할 때의 속도곡선으로 속도가 0km/h로 떨어진 경우는 그림 1에서 보듯이 역(정거장)에 정차되어 있음을 의미한다. 그리고 속도가 상승하는 경우 완만한 곡선으로 상승하지만 속도가 떨어지는 지점은 급속히 감소하는데 이는 표 3에서 언급하였듯이 가속도보다 감속도가 더 크기 때문이다.

(a) 시발역 ⇒ 종착역

(b) 시발역 ⇐ 종착역

그림 7 운행거리에 따른 도시철도차량의 주행속도
Fig. 7 Driving speed on driving line of urban transit

3.1 침두시 급전

전철변전소가 45/60[MVA]이고, 도시철도차량 운행노선에 6량 편성 열차가 침두시 4.3분으로 운전되고 있을 때 정상 상태에서 예상부하, 집전전압, 변전소 전류에 대하여 시뮬레이션 하였다.

전력을 공급하는 전철변전소(S/S)의 경우 T상은 가상 ATP까지 12.265km를, M상은 가상ATP까지 28.735km를 전력을 공급한다. 그림 8은 전철변전소의 M상과 T상의 순시 전력 특성을 보여준다. 초기에는 각 상마다 회생전력이 존

재하고 순시전력도 매우 높게 나타나고 시간이 흐를수록 일정하게 흐르고 있다. 이것은 상하구배 차이가 큰 구간에서 철도차량 운행에 따른 순시전력 증대와 운전 다이아에 보듯이 시발점 기준으로 도시철도차량이 운행되다가 종착역으로 갈수록 타 노선 운행 도시철도차량이 동일노선을 운행하는 것에 기인한 것으로 보인다. 표 4에서 보듯이 거리가 짧은 T상은 1시간 RMS 최대 5.933[MVA]이고 상대적으로 장거리인 M상은 1시간 RMS 최대 12.677[MVA]로 나타났는데, 이것은 급전거리가 길어질수록 부하인 운행차량이 다수 존재한다는 것을 나타낸다.

표 4 침두시 전철변전소 전력량

Table 4 The power of railway S/S during peak time

구 간	상	거리 [km]	1시간 RMS최대 [MVA]	15분 RMS최대 [MVA]	순시최대 [MVA]
가상ATP~ 전철S/S	T	12.265	5.933	7.963	14.067
전철S/S~ 가상ATP	M	28.735	12.677	15.841	26.331

(a) T상

(b) M상

그림 8 침두시 전철변전소 상부하 전력 동특성

Fig. 8 The power dynamic characteristic of phase load on Railway S/S during peak time

또한 도시철도차량 상부에 설치된 집전장치를 통해 차량 내부로 공급되는 순시전압 파형을 그림 9에서 보여준다. 표 5는 그림 9에 대한 집전전압으로 전철변전소 T상은 최소 26.46[kV], M상은 최소 25.72[kV]로 나타나 도시철도차량 최소 공급전압을 만족하고 있다.

그림 9 침두시 전차선 전압의 동특성

Fig. 9 The dynamic characteristic of voltage on contact wire

표 5 침두시 집전전압 및 전차선 전류 데이터

Table 5 Data of voltage and current on contact wire

상	거리 [km]	집전전압 최소[kV]	집전전압 최대[kV]	1시간 RMS 최대 전류[A]	순시 최대 전류[A]
T	12.265	26.461	28.286	193.2	511.8
M	28.735	25.720	28.426	399.3	957.6

(a) T상

(b) M상

그림 10 침두시 전철변전소 전류 동특성

Fig. 10 The dynamic characteristic of current on railway S/S

그림 10은 전철변전소에서 각 상으로 유출되는 전류의 동특성을 보여주고 있으며, T상에 비해 M상 전류가 큰 이유는 공급거리가 상대적으로 길어 부하인 도시철도차량이 많이 운행되고 있음을 의미하며, 상구배 구간이면서 철도차량 속도가 증가함에 따라 전류가 크게 흐름을 알 수 있다.

3.2 비침두시 급전

철도노선에 6량 1편성 도시철도차량이 비침두시 8분으로 운행되고 있을 때 침두시와 같은 조건으로 정상상태에서 예상부하, 집전전압, 변전소에서 부하로 공급되는 전류에 대하여 시뮬레이션을 하였다.

표 6에서 보듯이 전철변전소 T상은 침두시 1시간 RMS 최대 4.088[MVA], M상은 침두시 1시간 RMS 최대 8.154[MVA]로 나타났다. 그림 11은 전철변전소의 상부하 동특성 곡선으로 침두시에 비해 회생전력이 많이 발생하고 있는데 이는 침두시 타 차량으로 전력이 유입되는 반면 비침두시 전철변전소로 회생되고 있음을 의미한다.

한편 표 7에서 도시철도차량에 공급되는 전차선 전압은 T상은 최소 26.876[kV], M상은 최소 26.315[kV]로 표 4와 표 5의 침두시와 비교했을 때 운전시각이 길어짐으로써 부하가 작아지고 이로 인해 전력량이 적고 공급전압 강하가 작게 나타나고 있음을 알 수 있다.

표 6 비침두시 전철변전소 전력량

Table 6 The power of railway S/S during normal time

구 간	상	거리 [km]	1시간 RMS 최대 [MVA]	15분 RMS 최대 [MVA]	순시 최대 [MVA]
가상ATP~ 전철S/S	T	12.265	4.088	5.543	9.188
전철S/S~ 가상ATP	M	28.735	8.154	10.931	18.231

(a) T상

(b) M상

그림 11 비침두시 전철변전소 상부하 전력 동특성

Fig. 11 The power dynamic characteristic of phase load on railway S/S during normal time

그림 12 비첨두시 전차선 전압 동특성

Fig. 12 The dynamic characteristic of voltage on contact wire during normal time

표 7 비첨두시 집전전압 및 전차선 전류 데이터

Table 7 Data of voltage and current on contact wire

상	거리 [km]	집전전압 최소[kV]	집전전압 최대[kV]	1시간 RMS최대 전류[A]	순시최대 전류[A]
T	12.265	26.879	28.064	127.7	334.3
M	28.735	26.315	28.174	251.4	660.8

(a) T상

(b) M상

그림 13 비첨두시 전철변전소 상전류 동특성

Fig. 13 The dynamic characteristic of phase current on railway S/S during normal time

그림 13은 비첨두시 도시철도차량에 공급되는 전차선 상 전류 동특성을 보여준다. 그림 10과 유사한 패턴을 보이고 있으며, 전류는 2/3이상 감소되어 있음을 알 수 있다. 이는 비첨두시 부하인 도시철도차량 운행대수가 첨두시에 비해 상대적으로 적음을 의미한다.

감사의 글

“이 논문은 2012년도 한국교통대학교 교내학술연구비의 지원을 받아 수행한 연구임”

“The research was supported by a grant from the Academic Research Program of Korea National University of Transportation in 2012”

4. 결 론

본 논문은 도시철도차량을 운행하는데 있어 선로환경 및 차량의 공간적 분포를 고려하여 전철변전소의 급전계통에 나타나는 동특성을 분석하였다. 이를 위해 전차선로 정수 등 급전계통의 전기적인 특성 이외에도 철도차량의 견인 및 전기제동 특성 및 상하구배, 곡선반경 등 종합적인 시스템에 대한 해석을 하였다. 시뮬레이션 결과 선로환경으로 고려된 상구배 구간은 도시철도차량이 속도증가에 따라 흐르는 전류가 상대적으로 커지고 첨두시에 비해 비첨두시인 경우 전력량이 상대적으로 감소하고 전차선 전류도 적게 흐름을 확인할 수 있었다. 전차선 전압강하는 큰 차이를 보이지 않았으며, 전철변압기 용량인 45/60[MVA] 범위내에서 운행되고 있음을 알 수 있었다.

참 고 문 헌

- [1] Lee, Chang-Mu et al, “Analysis of Voltage Stability in Electric Railway Feeding System”, Proceeding of the KIEE, vol. 20, no. 4, pp. 37-42, 2006.8
- [2] Jae-Moon kim et al, “The study on the stability of feeder system considering driving conditions of highspeed train”, KIEE 2011 Spring conference of Society for Electric Facilities, 2011.4
- [3] Richard A.Uher, Program Manual for the Train Operations Model. Rail systems center, April 17, 2004.
- [4] Jae-Moon Kim, Yang-Su Kim, “Shinbundang Line Yongsan~Gangnam A master plan report of electric railway construction”, 2012.6
- [5] Yang-Su Kim, Hae-Chul You, Engineering of Electric Railway, Dong IL Press, 2004.3

저 자 소 개

김 양 수 (金 陽 洙)

2004년 고려대 대학원(공학). 1971년 1월~2002년 3월 철도청 근무. 1999년 11월 전기철도 기술사. 2008년 1월~현재 국토해양부 철도건설 심의위원. 2008년 1월~현재 항공철도사고조사 위원회 철도분야 자문위원. 2002년 3월~현재 한국교통대학교 철도전기전자공학과 교수

Tel : 070-8855-1665

E-mail : kysrail@ut.ac.kr

장 진 영 (張 珍 榮)

2006년 철도대 철도차량전기와 졸업. 2010년 중앙대 전자전기공학부 대학원 졸업(석사). 현재 동 대학원 전자전기공학부 박사과정

E-mail : ccy9247@hanmail.net

이 기 식 (李 基 植)

1973년 2월 서울대학교 전기공학과(공학사). 1977년 2월 서울대학교 전기공학과(공학석사). 1985년 2월 서울대학교 전기공학과(공학박사). 1978년 3월~현재 단국대학교 전자전기공학부 교수

Tel : 031-8005-3606

E-mail : kisiklee@dankook.ac.kr

구 경 완 (丘 庚 完)

1961년 2월 5일생. 1983년 충남대학교 전자공학과 졸업(학사). 1992년 동 대학원 전자공학과 졸업(박사). 1987년 현대전자반도체연구소 선임연구원. 1994년~2005년 영동대학교 전자·정보공학부 부교수. 2005년~현재 호서대학교 국방과학기술학과 교수

Tel : 041-540-9541

E-mail : alarmkoo@hoseo.edu

김 재 문 (金 才 文)

1994년 성균관대 전기공학과 졸업. 2000년 2월 동 대학원 졸업(공학). 2000년~2004년 현대모비스(주) 기술연구소 선임연구원. 2006년~현재 국토해양부 철도기술 전문위원. 2004년 3월~현재 한국교통대학교 철도전기전자공학과 부교수

Tel : 070-8855-1664

E-mail : goldmoon@ut.ac.kr