

트램 최적 급전계통 설계를 위한 전력 시뮬레이션

Power Simulation for Optimal Power Supply System Design of Tram

오성택*, 김백*†

Seongtaek Oh*, Baik Kim*†

Abstract DC feeding system is a means of power supply system to the electric railway, in which the received AC EHV(Extra High Voltage) from the commercial power systems is decreased to the appropriate voltage around 1,200V and become rectified to DC 1,500V. Currently, in Korea DC 1,500V of parallel feeds are adopted as a standard for the overhead railway feeder and the distance between the substations is about 4 to 10km by considering the line voltage drop. In this paper, we quote the load capacities of the substations for the design of optimal feeding systems of Annaba tram in Algeria, where they have different operating conditions from ours. We have studied the load concentration problem caused by vehicle movement and analyzed results from simulations.

Keywords : Electric Railway, DC Feeding, Voltage Drop, Tram, Simulation

초 록 전기철도에서 직류급전방식이란 상업용 전력계통으로부터 수전된 특고압의 교류전기를 변전소에서 적절한 전압으로 강압(1,200V)하고, 다시 정류장치를 통해 직류(1,500V 등)로 변환하여 전차선로에 공급하여 운전하는 방식이다. 현재 우리나라에서는 가공전차선인 경우 표준적으로 1,500V 를 사용하고 있으며 전철 변전소 간격은 차량의 운전조건에 따른 전압강하 등을 고려하여 약 4km~10km 간격으로 병렬 급전하여 운용한다. 본 논문에서는 우리나라와 다른 운전조건을 갖는 알제리 안나바 트램(Tram)의 최적 급전계통 설계를 위해, 차량의 이동에 의한 부하 집중 현상을 고려한 변전소 부하 용량을 산출하며 이에 따른 전력 시뮬레이션을 수행하고 결과를 해석 하였다.

주요어 : 전기철도, 직류급전, 전압강하, 트램, 시뮬레이션

1. 서 론

현재 트램은 지속 가능한 교통수단으로 인식됨과 동시에 단순한 교통 프로젝트가 아닌 보다 넓은 도시 발전을 위한 도시 프로젝트의 개념으로 도시 환경 및 삶의 질을 향상시키는 하나의 수단으로 유럽에서 큰 성공을 거두고 있다.

우리나라는 1970년대부터 대도시를 중심으로 대형 중량전철 차량을 운행할 수 있도록 지하철 건설에 대한 투자를 지속적으로 실시하였고 1990년대 도시철도법의 제정과 함께 도시철도사업에 대한 중앙정부의 재정지원이 구체화되면서 지방 대도시에서도 지하철 건설 사업이 본격적으로 추진되었다. 또한, 중소도시인 김해, 용인, 의정부 등에서는 대도시 연계교통

† 교신저자: 한국교통대학교 철도대학 철도전기전자공학과(whitek@ut.ac.kr)

* 한국교통대학교 대학원 철도전기전자공학과

체계 확보 차원에서 경량전철사업을 민간투자방식으로 추진하였다. 그러나 1990년대에 건설된 대부분의 중전철 노선과 2000년대에 건설된 경전철 노선은 막대한 사업비가 투자되었음에도 불구하고 당초 예상하였던 이용수요만큼의 수송 실적을 보이지 못하고 있다. 따라서 최근에는 비용이 저렴하고 중앙정부의 재정지원을 받을 수 있다는 이유로 트램에 대한 선호도가 높아지고 있다.

본 논문은 해외에서 도입되고 있는 알제리 안나바 트램의 견인전력 시뮬레이션 수행과 결과 분석을 통해 견인 전력망 산정을 검토하였다. 해외 급전 시스템의 경우 우리나라와 전원 전압 및 주파수가 달라 급전 계통의 설계에 있어서 전체 전력 소비량의 변화를 예측하고, 철도차량의 주행 성능 및 열차운행 시격, 운전전도 등을 정확히 파악하여야 한다.

따라서 최적의 급전계통을 구성하기 위해 정거장 및 변전소 위치, 선로 임피던스 및 계통 임피던스, 열차데이터, 견인력 및 제동력 데이터, 궤도의 구배 및 곡선반경, 열차 운행계획 등의 입력자료를 고려하여 전력 시뮬레이션을 수행하였다. 이러한 종합적인 시스템 해석을 통해 급전 시스템의 적정성 및 공급 전압 안정성을 확인하였다.

2. 본 론

2.1 안나바 트램의 노선 계획 및 변전소 설치 위치

본 논문에서는 본선구간 Kouba ~ Avant Port, 지선구간 Campus universitaire ~ Gare Multimodale 구간으로 총 연장은 21.7km로 34개역 사이에 정류기 용량 1,200[kW] DC750[V] 15개소의 직류 전철 변전소로 구성되어 있다. Table 1은 안나바 트램의 정거장 위치 및 급전계통 위치이다.

Table 1 Location of Substations in Main Line(Kouba~Avant port)

Km	정거장 명	승강장형식	역간거리(m)	SST 설치 위치
0+151	Kouba	상대식(폭:3,0m)	151	SST-1
1+846	Cité Ménadia	상대식(폭:3,0m)	465	SST-2
3+164	Victor hugo	엇갈림식(폭:3,0m)	294	SST-3
4+493	Kouche Noureddine	상대식(폭:3,0m)	530	SST-4
6+070	Pénétrante Ouest	상대식(폭:3,0m)	452	SST-5
7+491	Cité 400 logements	상대식(폭:3,0m)	784	SST-6
9+348	5 Juillet 1962	상대식(폭:3,0m)	401	SST-7
10+853	Parc d'attraction	섬식(폭:3m, 5m)	719	SST-8
11+633	Bidari	상대식(폭:3,0m)	780	SST-10
13+404	El Bouni Ouest	상대식(폭:3,0m)	569	SST-11
14+772	El Bouni Est	상대식(폭:3,0m)	603	SST-12
16+615	Lacombe	상대식(폭:3,0m)	409	SST-13
18+648	Sidi brahim	상대식(폭:3,0m)	688	SST-14
19+649	Avant port	상대식(폭:3,0m)	436	SST-15

Table 2 The Characteristic data of Vehicle

구분 Division	단위	내용
전기방식	Vdc	750
중량(공차/편성)	[ton]	55,019
중량(만차/편성)	[ton]	84,028
차륜경	[mm]	Maximun610, Minimum 530
최고운행속도	[km/h]	70
보조동력	[kW]	80×2
최대전인력	[kN/motor]	15.6
전기제동력	[kN/motor]	14.3
가속도	m/s ²	1.05
감속도	m/s ²	상용 1.2
	m/s ²	비상 2.0

2.2 안나바 트램 차량 제원

Table 2는 안나바 트램 급전계통을 운행하는 7모듈 4보기로 구성된 1편성의 트램 차량의 제원을 보여준다.

2.3 안나바 트램 운행 계획

안나바 트램은 총 연장 21.7km이며 운영계획은 Kouba 정거장을 시점으로 Wilaya, Gare SNTF, HayRym, Parc d' attraction, El Bouni centre, Sidi brahim 정거장을 경유하여 Avant port 정거장에 종착하며, 첨두시 운전시격은 3분이다. 지선의 운행계획은 Parc d' attraction 정거장에서 Campus universitaire 정거장을 경유하여 Gare Multimodale 정거장에서 종착하며 운전시격은 6분이다. 특히, Gare SNTF ~ Kouche Nouredine 구간은 열차운행 중복구간으로 길이는 570m로 첨두시 운전시격은 1.5분이다.

안나바 트램은 승객수요가 많은 출퇴근 시간대인 첨두시를 3분 시격으로 출발점과 종착역간 기준으로 정상상태 및 각 변전소 고장상태에서 예상부하, 집전전압, 변전소 전류에 대하여 시뮬레이션을 하였다. 본 논문에서는 안나바 트램의 본선에 대해서 기술하고자 한다.

2.4 열차운행 시뮬레이션 결과

안나바 트램의 상행선 및 하행선을 운행하는 열차 데이터, 선로데이터를 사용하여 시뮬레이션 하였으며 열차주행 시뮬레이션 결과 차량 운행 패턴은 아래 Fig. 1과 같다.

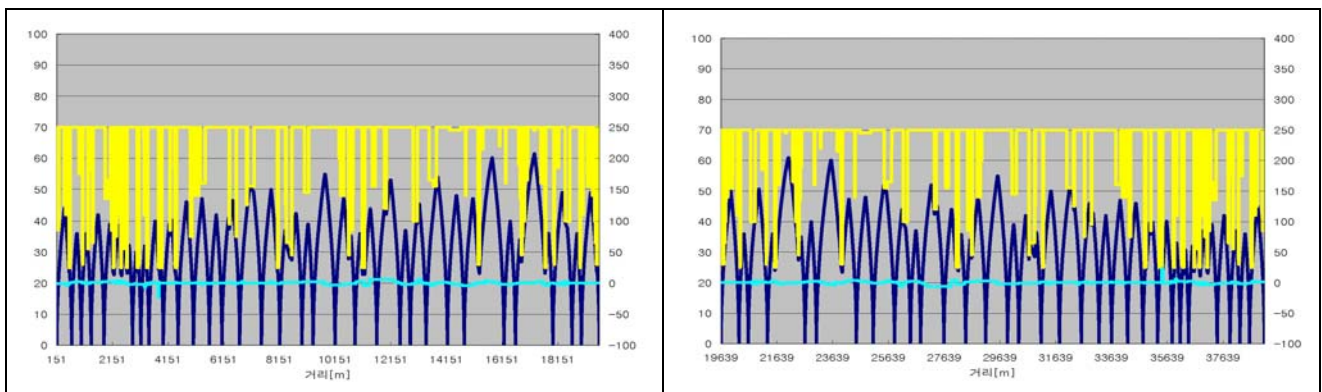


Fig. 1 Operation Speed – Location of Tram in main Line(Kouba ↔ Avant Port) Curve

2.5 운행전력 시뮬레이션 결과

변전소 설치 간격의 적정성 여부를 검토하기 위해, 정상 운전시와 각 변전소 고장 운전시를 전압강하에 대한 시뮬레이션을 수행하였으며, 열차 운전시의 전압강하는 최저선로 전압이 열차 구동 전압범위 (500~900V)를 벗어났는지를 검토하였다.

2.5.1 선로 전압

Table 3 Line Voltage of Main Line

구 분		최대전압 [V]	최저전압 [V]	
정상시		801,3	719,5	
각 변전소 고장시	Kouba	SST-1	801,3	687,4
	Cité Patrice Lumumba	SST-2	801,3	683,0
	Victor Hugo	SST-3	801,3	683,0
	Kouche Noureddine	SST-4	801,3	696,5
	Pénétrante Ouest	SST-5	801,3	706,9
	Cité 400 logements	SST-6	801,3	711,6
	5 Juillet 1 962	SST-7	801,2	706,6
	Parc d'attraction	SST-8	800,9	719,3
	Bidari	SST-9	800,6	717,8
	El Bouni Ouest	SST-10	798,9	711,6
	El Bouni Est	SST-11	798,2	705,5
	Lacombe	SST-12	802,1	704,4
	Sidi Brahim	SST-13	803,1	719,5
	Kouche Noureddine	SST-14	802,6	719,5
	Avant Port	SST-15	802,4	719,5

운행 전력 시뮬레이션 결과에 따라 상기 표와 같은 결과를 얻었다. 상기 Table 3에서 정상시/1개소 변전소 고장 시 어느 경우나 전압강하에 의한 최저 선로 전압이 열차 구동 최저 전압인 500V를 초과하므로, 현 변전소 간격은 적정하다고 판단된다.

2.6 견인전력 급전 용량 검토

본 논문은 알제리 안나바 트램에 적용 될 정류기 용량을 선정하여 최적의 견인 전력망을 구성하여 안정적인 전력 공급이 될 수 있도록 하였다.

2.6.1 정류기 용량 선정

전차선 급전용 정류기의 용량은 부하조건에 따라 결정되며, IEC 60146 규정에 따라 100% 부하에서 연속운전, 150% 과부하에서 2 시간 운전, 300% 과부하에서는 1 분간 운전할 수 있는 용량을 산정하였다. 전압 강하는 6%를 고려하였고 시뮬레이션 결과 중 정상시 및 변전소 1 개소 장애시의 최대 공급부하 적용을 기준으로 선정하였다. .

정상 상태의 변전소 최대 공급 부하 : 762.73[kW]

변전소 장애시 연장급전용 최대 공급 부하 : 1,037.61[kW]

정류기 용량은 정상시와 1개 변전소 장애 시 최대 공급부하에 전력 공급이 가능하여야 함으로 1,200kW x 1대를 추가 설치하여 충분한 용량을 확보한다.

2.6.2 정류기용 변압기 용량

정류장치의 전압강하는 변압기의 Impedance 및 정류기 소자의 직·병렬개수 등에 따라서 달라지므로 정류장치 제조사에서 제시되어야 하나 일반적으로 사용되고 있는 정류기의 부하 조건별 전압강하는 아래 Table 4 와 같다.

Table 4 Criteria of Rectifier Operation

IEC 60146	정류기의 부하조건	전압강하
V	정격출력에서 연속 정격출력 150%에서 2 시간, 정격출력 200%에서 1 분	8%
VI	정격출력에서 연속 정격출력 150%에서 2 시간, 정격출력 300%에서 1 분	6%

정류기 용량(Q) : 1,200 kW

직류 공칭 전압(E_d) : DC 0.75kV

정류기 출력전류(I_d)

$$I_d = \frac{Q}{E_d} = \frac{1,200kW}{0.75kV} = 1,600(A) \quad (1)$$

변압기 2 차측 출력 전류(정류기 입력전류)

$$I'_{as} = \text{정류기출력전압} \times \frac{\sqrt{2}}{\sqrt{3}} = 1,600 \times \frac{\sqrt{2}}{\sqrt{3}} = 1,306(A) \quad (2)$$

변압기 2 차측 정격전압(E_a)

$$E_{d0} = E_d \times (1 + \varepsilon) \quad (3)$$

E_{d0} : 직류무부하 출력전압, ε : 정류기의 전압변동률
(전압변동률 6%와 정류기의 DIODE STACK 손실 1%를 고려 7% 적용)

$$E_{d0} = 750 \times (1 + 0.07) \times 802.5[V] \quad (4)$$

$$E_a = \frac{\pi}{3 \times \sqrt{2}} \times E_{d0} = \frac{\pi}{3 \times \sqrt{2}} \times 802.5 = 594 \quad (5)$$

정류기용 변압기 용량 계산

$$T = \frac{\sqrt{3} \times E_a \times I'_{as}}{\eta} = \frac{\sqrt{3} \times 594 \times 1.306}{0.99} = 1.358[kVA] \quad (6)$$

상기 계산 결과에 따라 정류기용 변압기 용량은 1,400[kVA] 선정이 적당하다 결론을 얻었다.

3. 결 론

본 논문은 알제리 안나바 트램의 견인전원계통에 나타나는 현상을 정확히 파악하고 최적의 견인전력 급전계통을 구성하기 위해 정상 운전시와 각 변전소 고장 운전시를 고려하여 총 16회를 수행한 결과의 DATA이용하여 열차 구동 전압 범위(500~900V)를 벗어나는지 검토하여 변전소 간격의 적정성과 각 견인변전소의 최대부하 결과를 통해 견인용 정류기 및 정류기용 변압기 용량 산정을 하였다.

시뮬레이션을 위해 운행시격을 실제 운행시 적용될 3분으로 하였으며 열차다이아 및 선로 데이터에 따른 열차운행 시뮬레이션, 운행전력 시뮬레이션, 견인전력 급전용량을 분석하였다. 시뮬레이션 결과 동일 시간에 동일 운전 시격으로 운영을 하더라도 선로데이터 및 타 열차 간격에 따라 부하량 및 변전소의 전류 값이 차이가 남을 확인할 수 있었다. 이는 동일 조건으로 운영하더라도 열차다이아 및 선로데이터에 따라 열차 분포 위치가 변동되어 소비하는 부하량이 다르기 때문이다. 이 결과는 급전계통 설계 시 가장 중요한 요인으로써 교차시행의 조건을 다양하게 분석하여 최대 부하량 및 최대 전류량을 분석함으로써 안전하고 경제성 있는 급전계통을 설계할 수 있도록 하는 것이다.

후 기

2015년 한국교통대학교 지원을 받아 수행하였음

참고문헌

- [1] 김백 (2005) 전철전력공학, (주)기다리, 서울시 성동구, pp. 2-13.
- [2] T.K. Ho, Y.L. Chi, J. Wang, K.K. Leung, et al. (2005) Probabilistic load flow in AC electrified railways, IET Electric Power Applications, 152(4), pp. 1003-1013.
- [3] T.K. Ho, Y.L. Chi, J. Wang, K.K. Leung (2004) Load flow in electrified railway, IEEE PEMD 2004, Edinburgh, UK, pp. 498-503.
- [4] In-sung Jung, Joong-Ho Song, Kyu-Hyoung Choi (2013) Probabilistic calculation of Power loads in DC electric railway systems, Korea. *Journal of the Korean Society for Railway* , 13(11), pp. 1043-1048.
- [5] In-sung Jung, Joong-Ho Song, Kyu-Hyoung Choi (2013) The study on Simulation of Electrified Railway System considering Time Table & Performance Curve of Oran Tram in Algeria, Korea. *Journal of the Korean Society for Railway* , 13(7), pp. 1869-1870.