

정전류 철도 부하를 이용한 교류 전기 철도 급전 시스템 해석 Analysis for Autotransformer-Fed AC Electric Railroad System Using Constant Current Mode

이승혁*
Lee, Seung-Hyuk

정현수**
Jung, Hyun-Soo

김진오***
Kim, Jin-O

Abstract

This paper presents exact autotransformer-fed AC electric railroad system modeling using constant current mode. The theory is based on the solution of algebraic. The proposed modeling is considered the line self-impedances and mutual-impedances. Besides, the load modeling improved results are obtained as application to the proposed constant current mode. In the analysis on AT-fed AC electric railroad system circuit, a generalized analysis method using the loop equation on a case by case. the simulation objectives are to calculate the catenary and rail voltages with respect to ground, as the train moves along a section of line between two adjacent ATs. The model contains assumptions regarding the representation of the autotransformer, the impedance of the track/catenary system, and the grounding arrangements, which all effect the accuracy of the result. The modeling results seem very reasonable. It is established that techniques for the AC electric railroad system modeling and analysis.

1. INTRODUCTION

최근 산업의 고도화에 따른 물류량의 증가와 도시 인구 집중에 따른 교통난 심화로 교통 문제 해결이 심각하게 부각되고 있고 자동차의 급속한 증가와 육로 교통은 이제 한계 상황에 이르렀으며 공해, 소음 등 환경 오염에 대한 우려도 그 어느 때보다 높아지고 있다. 따라서 환경에 친화적이고 에너지를 유용하게 이용할 수 있으며 안정성과 신속성, 편의성 등 대중 교통 수단으로서 여러 가지 이점을 갖고 있는 전기 철도는 교통 문제 해결의 최선의 대안으로 제시되고 있다. 전기 철도 중 최근 가장 각광받는 것이 고속 전기 철도이다. 고속 전기 철도는 속도가 200 km/h 이상을 말하며 이러한 전기 철도의 전기 철도 차량은 급전 시스템에서 보면 이동과 정지를 반복하는 집중 부하이므로 전기적인 변화가 매우 심하고 한 급전 구간에 운행 스케줄에 의해 여러 전기 철도 차량이 운행할 경우 철도 차량간의 상호 영향으로 인해 전기적 특성이 수시로 변하는 특성을 지니고 있다.

본 논문에서는 단권변압기를 이용한 교류 전기 철도 급전 선로를 철도 부하를 정전류 모델로 모델링하고 회로망 해석법을 이용하여 보다 정확한 교류 전기 철도 모델을 제안하여 급전선로와 전기 철도 차량 각각의 경우에 대한 전차선 그리고 레일의 전압강하를 알아보고 향후 전압강하와 전압불평형에 대한 대책 방안에 활용하고자 한다.

* 한양대학교 석사과정, 학생회원

** 한양대학교 박사과정, 정회원

*** 한양대학교 부교수, 정회원

2. MODELING OF AUTOTRANSFORMER-FED AC ELECTRIC RAILROAD SYSTEM

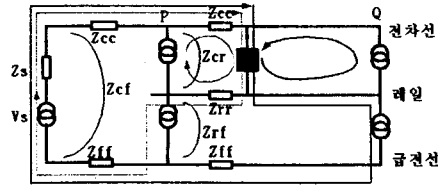


그림 1. 단권변압기를 이용한 교류 전기
철도 급전선로의 전류 분배

단권변압기 급전 방식은 변전소에서 급전선을 선로를 따라 급전선과 전차선 사이에 약 10 km 간격으로 단권변압기를 병렬로 설치하여 변압기 권선의 중성점을 레일에 접속하는 방식이다. 대용량 전기 철도 부하에서도 전압 변동, 전압 불평형이 적어 안정된 전력 공급이 가능하며 고속 전기 철도에서도 이 방식을 채택하고 있다. 전기 철도 급전되는 전류는 양 편 단권변압기의 권선에 교차하여 나타나는 전차선과 레일 전압에 양방향으로 공급되며 순환 전류는 단권변압기의 권선 ampere-turn의 균형을 유지하기 위하여 흐르게 된다. 레일에 흐르는 전류를 전기 철도 차량을 중심으로 각각 반대 방향을 갖는 전류가 단권변압기 쪽으로 흐르기 때문에 근접 통신선에 대한 유도 장애가 경감되는 장점을 가지고 있다. 또한 급전 전압이 차량 공급 전압의 2배이므로 전압 강하율이 작아 대 전력 공급에 유리하여 변전소의 이격 거리를 길게 할 수 있다.

2.1 Simulation and System Modeling

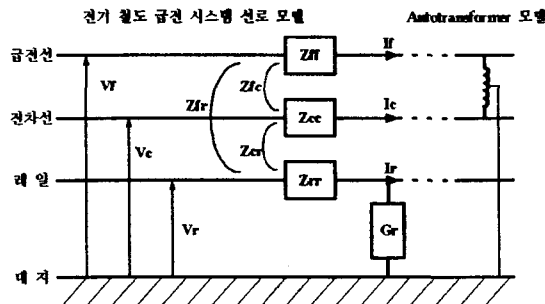


그림 2. 급전선, 레일, 전차선이 등가화 된 전기
철도 급전 시스템의 전류와 전압

그림 2에서 만일 레일과 대지 사이의 어드미턴스를 G_r 이라고 하고 무시한다면 전압강하는 전차선, 레일, 그리고 급전선에 이르는 선전류와 self & mutual impedance에 따라

$$V_c(x) - V_c(0) = -(Z_{cc}I_c + Z_{cr}I_r + Z_{cf}I_f)x$$

$$V_r(x) - V_r(0) = -(Z_{cr}I_c + Z_{rr}I_r + Z_{rf}I_f)x$$

$$V_f(x) - V_f(0) = -(Z_{cf}I_c + Z_{rf}I_r + Z_{ff}I_f)x$$

로 표현할 수 있다. 여기서 V_c , V_r , V_f 는 전차선, 레일, 급전선의 상전압이고 I_c , I_r , I_f 는 각각 상전류, 그리고 Z_{cc} , Z_{rr} , Z_{ff} 는 각 선의 self-impedance, Z_{cf} , Z_{cr} , Z_{rf} 는 각 선간의 mutual-impedance이다. 전차 선로의 self & mutual impedance 값은 레일과 케이블 재료의 특성과 크기, 시스템의 기하학적 구조 그리고 대지 전도율에 의해 구한다. 이 기본 수식에 의하여 전차선과 레일의 전압을

경우별로 구할 수 있다. 모델링을 위해 단권변압기와 운행되는 열차 수량에 따라 Case 1에서 Case 6까지 가정하여 표 1에 나타내었다. 여기서 AT_n 은 전철 변전소에서부터 가까운 순의 단권변압기를 나타내며 SP 는 급전 구분소를 나타낸다.

표 1. 경우에 따른 단권변압기와 운행되는 열차의 수

Case by Case (열차의 수) autotransformer	Case 1	Case 2	Case 3	Case 4	Case 5	Case 6
$AT_1 \sim AT_2$	1	2	1	1	2	2
$AT_3 \sim SP$	0	0	1	2	1	2

AT 사이의 구간은 10 km로 하였고 전철 변전소부터 급전 구분소까지의 거리는 25 km로 하였다. 교류 전기 철도 모델을 위한 입력 자료의 값은 표 2에 제시하였고 전기 철도 차량 부하 모델은 600 A의 정전류 모델로 모델링하였다.

표 2. 모델링에 대한 입력 자료

전철 변전소의 전원 및 전원 Impedance	Self-Impedance (Ω/km)	Mutual-Impedance (Ω/km)	전철변전소로부터 AT_n 의 거리
$V_S : 25 \text{ kV}$ $Z_S : 0.4+j0.015\Omega$	$Z_{cc} : 0.1192+j0.7522\Omega$ $Z_{rr} : 0.1618+j0.6709\Omega$ $Z_{ff} : 0.2036+j0.8847\Omega$	$Z_{cr} : 0.058+j0.369\Omega$ $Z_{cf} : 0.051+j0.361\Omega$ $Z_{rf} : 0.053+j0.373\Omega$	$x_p : 5 \text{ km}$ $x_Q : 15 \text{ km}$ $x_R(SP) : 25 \text{ km}$

2.1.1 System modeling

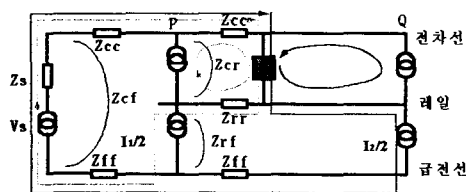


그림 3. Case 1의 경우 급전선로 모델링

Case 1의 경우는 표 1에도 나와 있지만 전철 변전소로부터 AT_1 와 그 다음 AT_2 사이에 열차가 한 대 운행되고 있는 경우로서 임의로 열차의 위치 (y_1)는 12 km 지점으로 가정하고 흐르는 전류는 식 (1)과 식 (2)와 같이 표현된다. 여기서 I_t 는 정전류로서 부하 모델링 된 열차에 흐르는 전류이다. 전차선에 걸리는 전압과 레일에 걸리는 전압을 구해보면

$$I_1 = \frac{x_Q - y}{x_Q - x_p} I_t \quad (1) \quad I_2 = \frac{y - x_p}{x_Q - x_p} I_t \quad (2)$$

전철변전소에서 AT_1 구간에서 전차선에 걸리는 전압을 V_{c1} 이라 하면 식 (3)처럼 된다.

$$V_{c1}(x) = V_S - Z_S \left(\frac{I_1 + I_2}{2} \right) - (Z_{cc} - Z_{cf}) \left(\frac{I_1 + I_2}{2} \right) x \quad (0 < x < x_p) \quad (3)$$

AT_1 에서 열차 사이의 구간에서 전차선에 걸리는 전압을 V_{c2} 이라 하면 식 (4)처럼 된다.

$$V_{c2}(x_1) = V_{c1}(x_p) - (Z_{cc} - Z_{cf})\left(\frac{I_2}{2}\right)(x_1 - x_p) - (Z_{cc} - Z_{cr})I_1(x_1 - x_p) \quad (x_p < x_1 < y_1) \quad (4)$$

열차에서 AT_2 사이의 구간에서 전차선에 걸리는 전압을 V_{c3} 이라 하면 식 (5)처럼 된다.

$$V_{c3}(x_2) = V_{c2}(y_1) + (Z_{cc} - 2Z_{cr} + Z_{cf})\left(\frac{I_2}{2}\right)(x_2 - y_1) \quad (y_1 < x_2 < x_Q) \quad (5)$$

마찬가지로 레일에 걸리는 전압도 각 구간별로 구해보면 식 (6), 식 (7), 식 (8)이 된다.

$$V_{r1} = 0 \quad (0 < x < x_p) \quad (6)$$

$$V_{r2}(x_1) = V_{r1}(x_p) + (Z_{cc} - Z_{cr})I_1(x_1 - x_p) - (Z_{cr} - Z_{rf})\left(\frac{I_2}{2}\right)(x_1 - x_p) \quad (x_p < x_1 < y_1) \quad (7)$$

$$V_{r3}(x_2) = V_{r2}(y_1) - (2Z_{rr} - Z_{rf} - Z_{cr})\left(\frac{I_2}{2}\right)(x_2 - y_1) \quad (y_1 < x_2 < x_Q) \quad (8)$$

위의 식에 의하여 계산된 값의 결과는 그림 4와 같다.

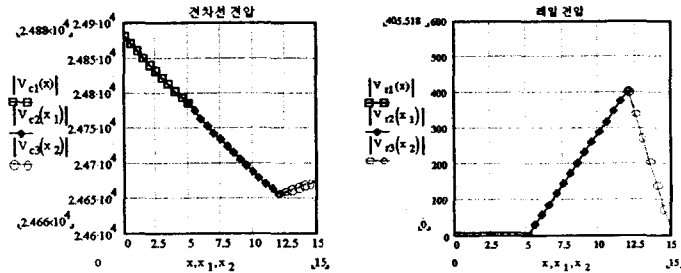


그림 4. Case 1의 경우 모델링 된 급전선로의 전차선 전압과 레일 전압 계산 결과

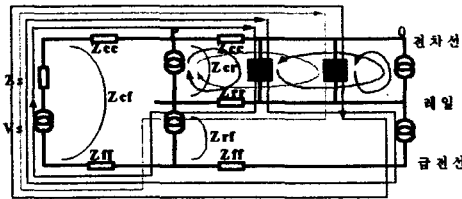


그림 5. Case 2의 경우 급전선로 모델링

그림 5의 Case 2의 경우는 AT_1 와 그 다음 AT_2 사이에 열차가 두 대 운행되고 있는 경우로서 임의로 열차의 위치 (y_1, y_2)는 각 7 km와 14 km 지점으로 가정하여 계산 결과를 보면

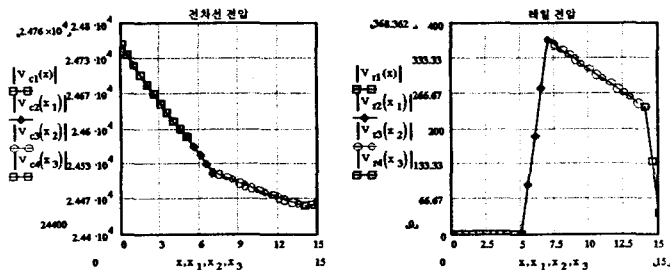


그림 6. Case 2의 경우 모델링 된 급전선로의 전차선 전압과 레일 전압 계산 결과

앞의 방법을 확장하여 같은 식으로 Case 3의 경우부터 Case 6의 경우까지 계산 결과는 다음과 같다.

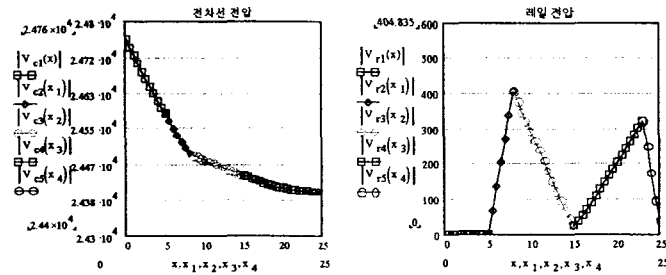


그림 7. Case 3의 경우 모델링 된 급전선로의 전차선 전압과 레일 전압 계산 결과

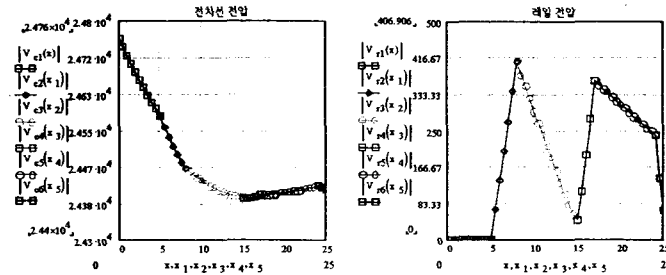


그림 8. Case 4의 경우 모델링 된 급전선로의 전차선 전압과 레일 전압 계산 결과

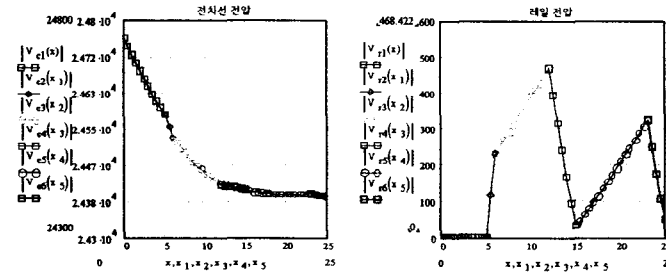


그림 9. Case 5의 경우 모델링 된 급전선로의 전차선 전압과 레일 전압 계산 결과

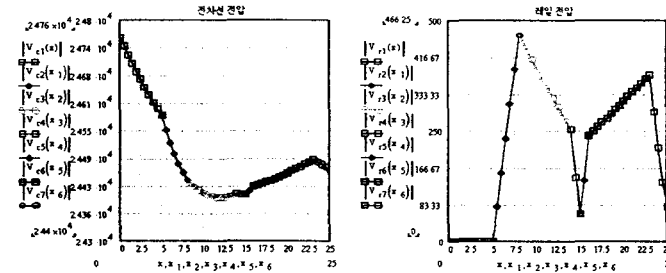


그림 10. Case 6의 경우 모델링 된 급전선로의 전차선 전압과 레일 전압 계산 결과

3. ANALYSIS OF MODELING RESULTS

모델링 결과를 살펴보면 급전선로에서 각 AT 구간사이에 열차를 두 대 이상 운행시키지 않은 이유는 식 (9)에 의한 열차의 스케줄 된 운행 시격을 고려해서이다. 여기서 B 는 1폐색 구간의 길이, L 은 1개 열차의 길이, C 는 신호기 투시거리, t 는 선행열차가 1번 신호기를 통과 후 3번 신호기가 바뀌는 데 소요되는 시간, V 는 열차의 속도를 각각 나타낸다. 이 식 (9)에 의해 결국 열차간 최소 이격 거리는 7.75 km로 계산된다. 따라서 AT 구간 사이에는 두 대의 열차만을 운행하였다.

$$T_r = \frac{(2B+L+C)}{\left(\frac{100V}{3600}\right)} + t \quad (9)$$

표 3. 각 경우 별 열차 운행 위치

	Case 1	Case2	Case 3	Case 4	Case 5	Case 6
열차의 위치	12km	7km, 14km	8km, 23km	8km, 17km, 24km	6km, 12km, 23km	8km, 14km, 16km, 23km

결과에서 보면 Case 1(그림 4)의 경우에서 Case 6(그림 10)의 경우까지 점점 전차선 전압강하가 심해지는 것을 볼 수 있고 Case 6(그림 10)의 경우에서 보면 급전 구분소 쪽으로 갈수록 다시 전압이 상승하는 것을 볼 수 있는 데 이는 단권변압기의 특성 때문이다. 단권변압기는 변압기에 2개의 권선이 상호의 공통부분으로 되어있고 권수비가 1:1 인 경우 자기용량의 2배가 선로 용량이 된다. 즉 부하전류를 인접한 양쪽의 단권변압기로 흡수하여 순환전류가 생기게 되는 것이다. 따라서 전압 강하가 작아지는 장점이 있다. 각 경우의 레일 전압이 열차가 있는 위치에서 발생하는 것은 레일은 접지가 되어 있어 열차가 운행되는 위치에서만 전압이 발생하기 때문이다.

4. CONCLUSIONS

본 논문에서는 단권변압기를 이용한 교류 전기 철도 급전 선로를 철도 부하를 정전류 모델로 모델링하고 회로망 해석법을 이용하여 보다 정확한 교류 전기 철도 모델을 제안하였으며 급전선로와 전기 철도 차량 각각의 경우에 대한 전차선 그리고 레일의 전압강하를 알아보았다. 본 논문에서 모델링 된 급전선로는 고장이 발생하지 않았을 경우로서 전철 변전소에서 급전 구분소까지 25 km 구간만을 모델링하였다. 이는 앞으로의 연구 방향인 주 변압기의 T좌와 M좌에 대한 전압 불평형 또는 연장급전 시 전압강하에 대한 정보를 부여함으로써 전압강하와 전압불평형에 대한 대책 방안에 대한 지표가 될 수 있다.

REFERENCES

1. Roland John Hill, Ibrahim H. Cevik(1993), "On-Line Simulation of Voltage Regulation in Autotransformer-Fed AC Electric Railroad Traction Networks", IEEE Transaction on Vehicular Technology, Vol. 42, No. 3, pp.365-372
2. Chih-Ju Chou, Ying-Tung Hsiao, Jhane-Li Wang, Yaw-Tzong Hwang(2001), "Distribution of Earth Leakage Currents in Railway System with Drain Auto-Transformers", IEEE Transaction on Power Delivery, Vol 16, No. 2, pp.271-275
3. R. Natarajan, T. A. Kneschke, W. Naqvi, M. A. Lopez-Lopez, J. Hong, R. M. Bucci(1997), "Short Circuit Currents of the SEPTA Traction Power Distribution System", IEEE Industry Applications Magazine, pp.52-59
4. K. S. Bahra, P. G. Batty(1998), "Eathing and Bonding of Electrified Railways", International Conference on Developments in Mass Transit System, 20-23 April 1998, Conference Publication No. 543, pp. 296-302
5. 日本 電氣學會(2000), "最新 電氣鐵道工學", pp.165-168