

# 정교한 전차선로의 회로모델링 및 범용성 해석 기법 개발

## A Study on General Purpose Analysis Technique for Railway Electrification System

홍재승\*      오광해\*\*      창상훈\*\*      김발호\*\*\*      김정훈\*\*\*\*  
Hong, Jae-Seung    Oh, Kwang-Hae    Chang, Sang-Hoon    Kim, Bal-Ho    Kim, Jung-Hoon

### ABSTRACT

This paper presents a new static circuit modeling methodology amenable to analysing the electric railway system. The accuracy and practicability of the proposed approach are demonstrated with the railway system containing 2 to 6 train

### 1. 서    론

1970년대에 산업의 발달은 수도권지역의 인구밀집현상을 초래하여 도시의 교통이 혼잡하게 되었고, 도시간의 빠르고 정확한 운송이 필요하게 되었다. 이에 따라 지중화 및 고속화에 강점을 갖는 전기철도가 도입되었고 현재도 수도권지역의 지하철건설 및 확장이 진행 중에 있다. 이와 같은 설비투자 이외에도, 수송능력을 증가시키기 위하여 전차 운행횟수의 증가와 차량의 대용량화가 추진되고 있는데, 이는 부하전류를 증가시키게 되어 적절한 계획을 할 수 있는 전차선로 해석이 필요하게 되었다.

전차선로 해석에 대한 연구로는 J. D. Glover[1]이 주파수, 대지저항률, 급전선과 귀선의 위치 등을 입력으로 하여 전차선의 임피던스를 포트란 프로그램으로 계산한 후, 전차선로를 T 등가회로로 변환하여 여러 대의 전차전압을 계산하였다. 또 R. J. Hill[2]은 단선과 복선의 전차선로를 전차 한 대를 기준으로 전압을 해석하는 시뮬레이터를 개발하였다. 이 시뮬레이터는 시간변화에 따른 전차선, 레일의 전압과 전차전압을 계산할 수 있으며, 전차선로계획을 위한 변전소와 AT의 최적의 간격 등을 구할 수 있다. 그러나 전차선로에 주안점을 두고 회로모델을 구성하였기 때문에 3상 전원계통에서 나타나는 제현상을 다루지 못하였고, 전차선로에 복수의 전차를 동시에 고려할 수 없어 실제 전차선로에 나타나는 영향을 풀 수 없다. 또한 이 해석방법들은 레일의 전위가 "0"이라는 가정[3] 하에 전차의 위치에 따라 전류가 분배되는 방법을 이용하였으나, 실제 전차선로에서는 레일의 전위가 존재하기 때문에 정확한 해석방법이라 말할 수 없다.

본 논문에서는 우리 나라에서 채택하고 있는 AT급전방식의 전차선로를 대상으로 단권변압기의 내부임피던스와 상호임피던스를 고려하여 여러 대의 전차가 운행되는 상황을 루우프 해석법을 이용하여 2대에서 6대까지 운행할 때 발생하는 전차선로의 전압, 전류를 구하였다.

\* 홍익대학교 전기제어공학과 석사과정,      학생회원  
\*\* 한국철도기술연구원,      정회원  
\*\*\* 홍익대학교 전기제어공학과 교수,      비회원  
\*\*\*\* 홍익대학교 전기제어공학과 교수,      정회원

## 2. 전차선로 해석

### 2.1 전차선로 등가모델

교류 전기철도는 3상 전력계통과 연계되어 전력을 공급받는다. 그림 1은 교류 AT급전계통을 나타내고 있다. 3상 전력은 스코트 변압기를 이용하여 2상으로 변환되어 M상과 T상으로 전력을 공급한다. 각 상으로 투입되는 전력은 단권변압기를 통하여 전차에 공급을 하게 된다.

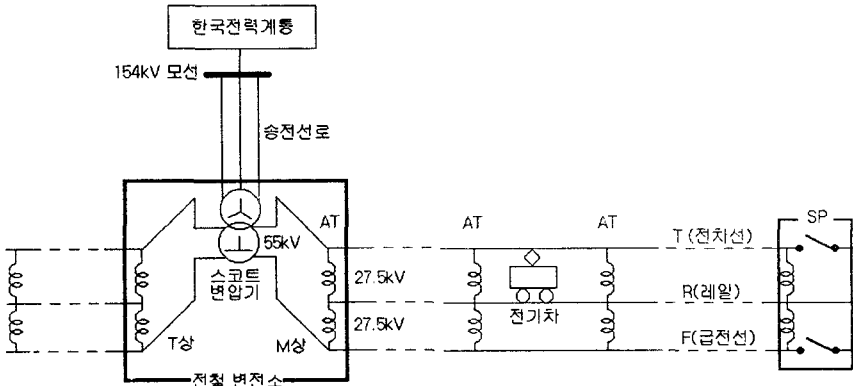


그림 1. 교류 AT급전계통의 구성도

이를 회로로 모델링하기 위하여 기존과 달리 단권변압기가 가지고 있는 임피던스를 고려하여 표현한 회로가 그림 2이다. 이 회로의 특징으로는 단권변압기를 종속전압원으로 표시하였고 전차는 임피던스부하로 표시를 하였다.

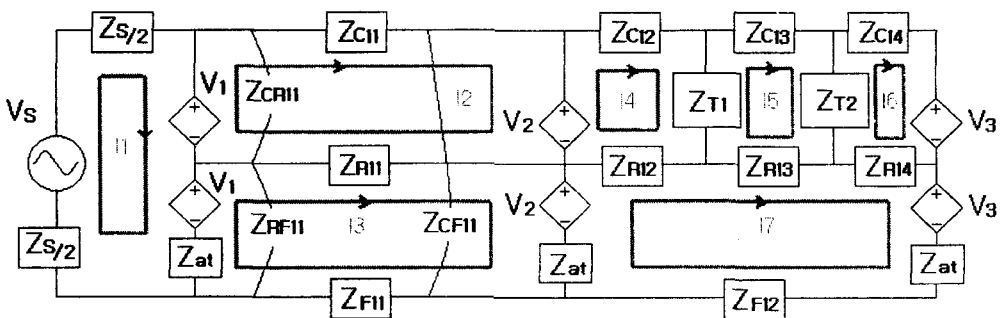


그림 2. 전차선로의 등가모델(전차가 두 대인 경우)

### 2.2 수학적 모델 및 해석기법

그림 2에 루우프 해석법을 도입하면 미지변수는 10개로, 루우프 전류 7개와 단권변압기의 전압이다. 마찬가지로 방법으로 만일 첫 번째 단권변압기 사이에 m대의 전차가 있고, 두 번째

단권변압기 사이에 n대의 전차가 있다고 가정하면 총 미지수는 (m+n+5)개가 된다. 이를 풀기 위해서는 먼저 각각의 루우프에 대한 식을 세운다. 이 식의 개수는 (m+n+2)개가 되고, 또 각각 단권변압기로 분배되는 전류가 같으므로 여기서 3개의 식을 더 얻을 수 있다. 이렇게 하면 식의 개수와 미지수의 개수가 같아지게 되어 해가 구해진다. 이 식을 행렬로 구성하여 행렬식을 풀어서 각각의 값들을 구할 수 있다. 이렇게 하여 구하여진 행렬식의 형태는 다음과 같다.

$$Y = [A] \cdot X \quad (1)$$

여기에서 Y는 (m+n+8)×1 벡터로 전철용변압기를 통하여 공급되는 전압이 포함되고, [A]는 (m+n+8)×(m+n+8) 행렬로 임피던스 성분 및 어드미턴스 성분이 포함되어 있다. X는 우리가 구하고자 하는 미지수로 (m+n+8)×1 벡터이다. 55,000[V]의 전철용변전소의 경우를 보면 다음과 같다.

$$\begin{bmatrix} 55000 \\ 0 \\ \vdots \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Z_1 & 0 & \cdots & -Z_{at} & 2 & -1 & 0 \\ 0 & Z_2 & \cdots & 0 & -1 & 0 & 0 \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ 0 & 0 & \cdots & Z_k & 0 & -1 & 1 \\ 2 & -1 & \cdots & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \cdots & -1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \cdots & -1 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} I_1 \\ I_2 \\ \vdots \\ I_{m+n+5} \\ V_1 \\ V_2 \\ V_3 \end{bmatrix} \quad (2)$$

### 3. 전차선로의 범용성 해석 알고리즘

#### 3.1 해석기법의 입력자료

전차선로에서 전차를 2대에서 6대까지 변화시키면서 단권변압기의 전압과 루우프 전류, 그리고 각 node의 전압을 구하였다. 먼저 전차선로의 길이는 20km로 가정하였고, 단권변압기의 간격은 10km로 하였다. 또한 전차의 임피던스는 전차의 소비전력을 4MW로 하여 계산하였다. 또한 전원임피던스( $Z_S$ )와 전차선, 레일, 급전선의 임피던스( $Z_C$ ,  $Z_R$ ,  $Z_F$ ), 전차선-레일, 전차선-급전선, 레일-급전선간의 상호임피던스( $Z_{CR}$ ,  $Z_{CF}$ ,  $Z_{RF}$ )는 단위길이 당 임피던스를 이용하여 나타냈다. 또한 전차의 표정속도를 40[km/h]라 하고 계산한 결과, 전차의 간격은 10/3[km]여서 단권변압기의 사이에는 전차가 최대 3대까지 들어갈 수 있다.

표1. 임피던스의 크기

종류	크기	단위
전원임피던스( $Z_S$ )	2.36+j19.5	[ $\Omega$ ]
단권변압기 내부임피던스( $Z_{at}$ )	0.0287+j0.44912	[ $\Omega$ ]
전차선의 임피던스( $Z_C$ )	0.194+j0.731	[ $\Omega$ /km]
레일의 임피던스( $Z_R$ )	0.009+j0.467	[ $\Omega$ /km]
급전선의 임피던스( $Z_F$ )	0.122+j0.587	[ $\Omega$ /km]
전차선-레일의 임피던스( $Z_{CR}$ )	0.053+j0.373	[ $\Omega$ /km]
전차선-급전선의 임피던스( $Z_{CF}$ )	0.051+j0.361	[ $\Omega$ /km]
레일-급전선의 임피던스( $Z_{RF}$ )	0.058+j0.369	[ $\Omega$ /km]

### 3.2 사례연구

전차선로에 전차를 2대~6대까지 적용한 결과는 다음 표2~표6과 같다. 전차가 세대까지는 두 번째 구간에 모두 있는 것으로 하였고 네 대가 투입되면서부터 첫 번째 구간에도 전차가 있다고 모의하였다.

표 2. 계산 결과(전차 두 대인 경우).

종류	크기	단위
V <sub>1</sub>	27220-j1383.7	[V]
V <sub>2</sub>	27042-j1806.4	[V]
V <sub>3</sub>	26902-2148.9	[V]
I <sub>1</sub>	143.71-j11.673	[A]
I <sub>2</sub>	1.26.31+j13.502	[A]
I <sub>3</sub>	161.12-j24.697	[A]
I <sub>4</sub>	163.35-j40.845	[A]
I <sub>5</sub>	19.6099+j7.6061	[A]
I <sub>6</sub>	-124.07+j19.262	[A]
I <sub>7</sub>	124.07-j19.262	[A]

표 3. 계산 결과(전차가 세 대인 경우).

종류	크기	단위
V <sub>1</sub>	27014-j2041.4	[V]
V <sub>2</sub>	26726-j2668.7	[V]
V <sub>3</sub>	26551-j3052.1	[V]
I <sub>1</sub>	212.87-j24.609	[A]
I <sub>2</sub>	189.28-j47.587	[A]
I <sub>3</sub>	236.46-j44.459	[A]
I <sub>4</sub>	279.36-j21.149	[A]
I <sub>5</sub>	137.21-j52.211	[A]
I <sub>6</sub>	-4.5779+j11.5556	[A]
I <sub>7</sub>	-146.37+j28.068	[A]
I <sub>8</sub>	146.37-j28.068	[A]

표 4. 해석 결과(전차가 네 대인 경우).

종류	크기	단위
V <sub>1</sub>	26782-j2683.3	[V]
V <sub>2</sub>	26381-j3479.2	[V]
V <sub>3</sub>	26201-j3838	[V]
I <sub>1</sub>	280.53-j40.336	[A]
I <sub>2</sub>	260.0.-j14.89	[A]
I <sub>3</sub>	119.06+j3.8695	[A]
I <sub>4</sub>	301.02-j65.782	[A]
I <sub>5</sub>	273.04-j28.825	[A]
I <sub>6</sub>	132.77-j8.625	[A]
I <sub>7</sub>	-7.1239+j12.3757	[A]
I <sub>8</sub>	-147.04+j33.088	[A]
I <sub>9</sub>	147.04-j33.088	[A]

표 5. 해석 결과(전차가 다섯 대인 경우).

종류	크기	단위
V <sub>1</sub>	26585-j3303.6	[V]
V <sub>2</sub>	26208-j4216.6	[V]
V <sub>3</sub>	26042-j4506.3	[V]
I <sub>1</sub>	350.35-j54	[A]
I <sub>2</sub>	127.86+j43.122	[A]
I <sub>3</sub>	-13.8743+j60.9556	[A]
I <sub>4</sub>	-155.83+j77.779	[A]
I <sub>5</sub>	572.85-j151.12	[A]
I <sub>6</sub>	266.16-j39.438	[A]
I <sub>7</sub>	126.87-j15.367	[A]
I <sub>8</sub>	-11.9883+j9.4392	[A]
I <sub>9</sub>	-150.86+j33.906	[A]
I <sub>10</sub>	150.86-j33.906	[A]

표 6. 계산 결과(전차가 여섯 대인 경우).

종류	크기	단위
$V_1$	26263-j3971	[V]
$V_2$	25725-j4872.8	[V]
$V_3$	25608-j5054.8	[V]
$I_1$	413.75-j76.228	[A]
$I_2$	534.52-j93.871	[A]
$I_3$	394.55-j71.937	[A]
$I_4$	256.03-j47.448	[A]
$I_5$	118.50-j21.477	[A]
$I_6$	292.98-j58.586	[A]
$I_7$	311.28-j64.751	[A]
$I_8$	173.60-j38.376	[A]
$I_9$	-38.876-j11.8362	[A]
$I_{10}$	-100.19+15.312	[A]
$I_{11}$	100.19-j15.312	[A]

#### 4. 결론 및 검토

본 논문에서는 전차선로의 전류, 전압의 분포를 루우프 해석법을 이용하여 구하는 방법을 제시하였고, 사례연구를 통하여 제안된 방법의 실용성과 정확성을 검증하였다.

향후 연구과제로서는 전차가 전동기로 되어있으므로 부하모델과 전력방정식을 도입하는 일이다. 이를 위해서는 우선 마디해석법을 도입하여 일반적으로 적용할 수 있는 모델링기법을 마련하는 것이고, 다음 정전력부하 개념을 도입하여 제안된 기법의 실용성과 정확도를 제고해야 할 것으로 보인다.

본 연구는 철도청의 지원(KR98112A)에 의하여 수행되었음

#### 참고문헌

1. J. D. Glover, A. Kusko, S. M. Peeran (1982), "Train Voltage Analysis for AC Railroad Electrification", IEEE, IASS2:ISA, pp207-216.
2. R. J. Hill, I. H. Cevik (1993), "On-Line Simulation of Voltage Regulation in Autotransformer-Fed AC Electric Railroad Traction Networks", IEEE Transactions on Vehicular Technology, Vol.42, No.3, pp.365-372.
3. JR教本研究會編 (平成 2年) "變壓器", pp.34-35, 日本鐵道電氣技術協會.
4. 이육화, 홍재승, 김정훈, 창상훈, 오광해 (1999) "전차선로의 전류분포분석 프로그램 개발"

대한철도학회 춘계학술대회논문집 pp.336-343

5. 오광해, 창상훈, 김정훈, 홍재승 외 12인 (1998), “전류 MAP을 이용한 전차선로 관리시스템 구축 연구”, 철도청.
6. 오광해, 창상훈 외 8인 (1997), “산업선 전기설비 노후도에 따른 최적의 개량방안 연구”, 철도청.