

전기철도 AT급전계통의 열차 운행 모의 해석 알고리즘 연구

추동욱\*

김재철\*\*

정용철\*\*\*

전용주<sup>§</sup>

임성정<sup>§</sup>

A study on modified algorithm to operating train simulation of AT feeding systems

Dong-Woog Choo\* Jae-Chul Kim\*\* Yong-Chul Jung\*\*\* Yong-Ju Jun<sup>§</sup> Seong-Jeong Lim<sup>§</sup>  
 \*Kyung Moon college \*\*Soong Sii university \*\*\*Korea National Railroad <sup>§</sup>Hyun-Dai heavy industries CO.,LTD.

**Abstract** - This study presents a study on modified algorithm to operating train simulation of AT feeding systems. In this study equivalent impedance is constructed by  $Z_c, Z_r, Z_f, Z_{cr}, Z_{rf}, Z_k$ . The train current flows through the all auto-transformer corresponding to track impedance. To calculate train voltage from analyzing the railway systems, the algorithm is based on the K. C. L. K. V. L. superposition and circuit separation method. Multi-train's voltages are determined by calculating the catenary voltage at each train's position and adding up these train's voltage drop. Case studies use a field operational data, show that the proposed method is easily applied.

1. 서 론

전기철도의 급전계통은 불평형 상태로 운전이 이루어 지므로 정상분만 고려하여 단상계통으로 해석하는 조류 계산을 하기에는 무리가 따르게된다[1]. 교류전기철도의 급전계통의 경우 3상 교류 154[kV], 60[Hz] 2회로(1회선은 예비) 방식으로 수전 하여 Scott 변압기에 의해 단상 2×25[kV] AT(Auto Transformer:단권변압기) 급전방식이라는 특이한 형태로 구성되어 있기 때문에 [2,3]. 기존에 송배전 계통에 적용하는 방법으로는 정확한 해석의 결과를 얻을 수 없다[4]. 열차를 안전하게 운전하기 위해선 전차선의 공급전압이 어느 범위를 유지하여야하며, 급전계통에서 보면 열차는 지속적으로 이동하는 집중 부하이므로 급전계통의 전기적 특성뿐만 아니라 운행조건 및 열차특성 등의 종합적인 시스템 해석이 필요하게 된다. 본 논문은 불평형 운전을 하게되는 급전선로의 해석을 위하여, 첫째, 급전계통과 열차에 대한 모델링을 제시하였고 둘째, AT의 특성 상 전류의 분배가 이루어지게 되는데 전류 분배의 기준을 제시하였으며 셋째, 열차 제원과 운행조건에 의한 간이형TPS (Train Performance Simulator)를 구현하여 단일 열차, 다수열차 운행시 계통의 전압 분포와 열차 전압을 구하기 위해 MATLAB을 이용하여 시뮬레이션 P/G을 개발하였다. 시험계통에 적용하여 상당히 정확한 값을 예측 할 수 있었다.

2. 운행 모의 알고리즘

2.1 급전계통의 전기적인 등가회로 구성

AT의 위치와 변전소의 공급구간, 열차의 위치 등의 구성을 확인하고 급전계통 및 열차를 등가회로로 그리면 그림 1과 같다. 그림 1에서 주변압기는 전압원으로, 주 변압기의 내부임피던스, AT의 내부임피던스와 선로의 자기임피던스와 상호임피던스를 고려하였으며, AT는 전

압원으로, 열차는 순간적으로 정전력 부하이므로 전류원으로 취급하였다.

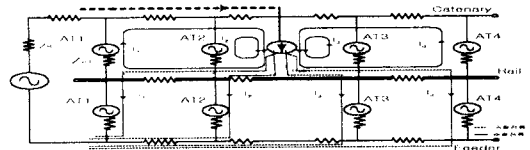


그림 1 AT계통의 전기적 등가회로  
 Fig. 1 Electrical equivalent circuit of AT feeding system

급전계통의 전류는 순환전류( $I_{loop}$ )와 귀환전류( $I_{return}$ )로 AT에 의하여 분류하게된다. 따라서 귀환전류 및 순환전류의 열차전류( $I_{train}$ )와의 관계는 식(1)과 같이 나타낼 수 있다. 각 AT에 의해 공급되는 전류는 2개로 분리된 동등한 크기와 위상 요소로 나눌 수 있다. 열차 전류는 식 (2)을 이용하여 구할 수 있으며 분류되는 전류는 열차 전류와 식 (3)의 관계를 가진다.

$$I_{loop} = I_{return} = 0.5I_{train} \tag{1}$$

$$I_{train} = \frac{P_{train}}{V_{train} \times \cos \theta} \tag{2}$$

$$0.5I_{train} = I_1 + I_2 + I_3 + I_4 \tag{3}$$

여기서  $P_{train}$  은 매 순간 열차의 전력을,  $V_{train}$  은 열차 전압을 의미한다. 그림 1에서  $Z_n$ 는 전원단의 단락임피던스를,  $Z_{AT}$ 는 AT의 내부임피던스를 의미한다.

2.2 급전계통 내에 존재하는 AT에 분배되는 전류

그림 1에서 각 AT에 의해 분류되는 전류를 구하기 위해 선로의 자기 임피던스와 상호임피던스( $Z_M$ ), AT의 내부임피던스( $Z_{AT}$ )를 합산한 등가 임피던스를 계산한다. 전차선, 레일, 급전선의 자기 임피던스를 각각  $Z_r, Z_c, Z_i$ , 전차선-레일, 레일-급전선, 급전선-전차선의 상호 임피던스( $Z_M$ )를 각각  $Z_{cr}, Z_{rf}, Z_{ic}$ 라 하면,  $I_{train}$ 과 n 번째 전압원 사이의 합산된 등가임피던스는  $Z_1, Z_2, Z_3, Z_4$  값으로 표현되며 열차의 위치에 따라 변화하게 된다 [4]. 분배되는 전류는 식(4)에 의해 결정된다.

$$I_n = \frac{\frac{1}{Z_n}}{\frac{1}{Z_1} + \frac{1}{Z_2} + \frac{1}{Z_3} + \frac{1}{Z_4}} \times I_{train} \tag{4}$$

여기서  $I_n$  ( $n=1, 2, 3, 4$ )는 n 개의 전압원에 의해 분배되는 전류이고  $\frac{1}{Z_n}$ 는  $I_{train}$  과 n번째 전압원 사이의 합산된 등가임피던스의 역수이다.

## 2.2.1 귀환 전류와 순환 전류에 의한 전류 분배

그림 2와 그림 3에서 나타난 결과를 비교해보면, AT의 특성이 정확하게 반영된 방법이 순환 전류에 의한 열차 전압 계산임을 알 수 있다. 즉 전류의 분배 기준은 순환전류에 의함이 타당함을 알 수 있다

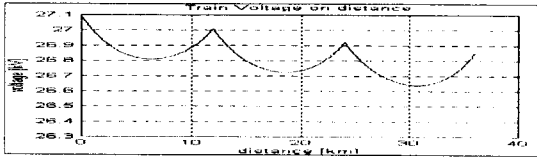


그림 2 순환전류에 의한 거리별 열차전압  
Fig. 2 Train voltage on distance ( $I_{loop}$ )

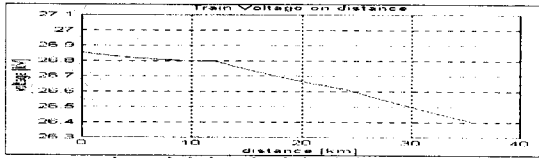


그림 3 귀환전류에 의한 거리별 열차전압  
Fig. 3 Train voltage on distance ( $I_{return}$ )

## 2.3 단일 열차와 다수 열차의 해석

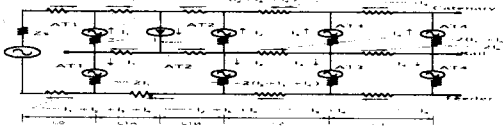


그림 4 열차가 AT1-AT2 사이에 위치  
Fig. 4 Train locates between AT1-AT2

단일 및 다수열차의 해석을 위해서는 각 열차의 상호 작용을 고려한 전류의 합산이 필요하다. 그림 4는 열차가 AT1과 AT2사이에서 운행될 경우의 전류의 흐름을 나타내고있다. 회로에서도 확인할 수 있듯이 열차와 AT의 위치에 따라서 전류의 크기와 방향이 바뀌게 되므로 열차별 정확한 위치와 상태 파악이 선행되어야 한다. 따라서 합산하는 방식은 각각의 열차의 전류를 독립적으로 계산하여 열차 위치별 계통 전체 전압을 도식한 후 계통에 투입된 모든 열차로 확산하여 해석하는 전압 합산 방식을 사용하였다.

## 2.4 계통해석 알고리즘 흐름도

그림 5는 본 논문에 사용된 계통해석 흐름도를 나타낸다[7].

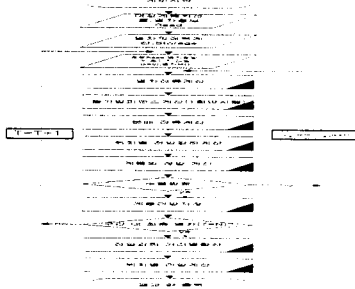


그림 5 계통해석 흐름도  
Fig. 5 Flow-chart to analysis systems

## 3. 사례 연구

### 3.1 단일열차 운행시 계통 해석

결과의 타당성 및 검증을 위하여 선로의 구성과 공급전원의 특성, 선로의 임피던스, 열차의 특성 등의 예제 계통은 금정역~남태령까지의 구간을 모의하였으며, 주어진 선로의 임피던스는 표 1과 같으며 예제 계통은 전원→(1.97(km))AT1→(3.97(km))AT2→(8.44(km))AT3으로 구성되어있다[5].

표 1 계통 임피던스의 크기

Table 1 Magnitude of system impedances

임피던스 종류	크기
전원 ( $Z_s$ )	$0.146+j3.365[\Omega]$
AT내부 ( $Z_{AT}$ )	$0.0287+j0.44912[\Omega]$
전차선 ( $Z_c$ )	$0.1771+j0.7485[\Omega/km]$
레일 ( $Z_r$ )	$0.2470+j0.748520[\Omega/km]$
급전선 ( $Z_f$ )	$0.3597+j0.9576[\Omega/km]$
전차선-레일 ( $Z_{cr}$ )	$0.0587+j0.3778[\Omega/km]$
레일-급전선 ( $Z_{rf}$ )	$0.0586+j0.3646[\Omega/km]$
급전선-전차선 ( $Z_{cf}$ )	$0.0582+j0.4699[\Omega/km]$

#### 3.1.1 운행선로의 특성이 제외된 계통해석

그림 6은 해당 구간내 1대의 열차가 정격 5.66(MW)의 정속도로 운전중인 경우의 거리별 열차 전압을 나타내었다. 예제 계통 내에 AT의 간격이 등 간격이 아니므로 그림의 거리별 열차전압의 변화가 비대칭의 그래프로 출력되어되었다.

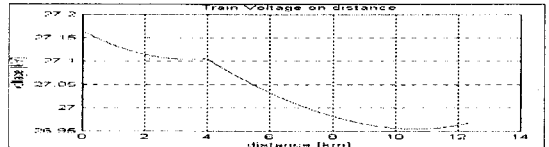


그림 6 예제 계통의 열차 전압  
Fig. 6 Train voltage in sample systems

#### 3.1.2 운행선로의 특성이 포함된 계통해석

계통내의 선로 조건을 고려하기 위해 매 거리 (0.1(km) 간격) 별 속도, 구배, 곡선 등이 주어지고 주어진 데이터로부터 거리별 시간, 가속도를 구하여 견인력을 구하고 견인력으로부터 열차의 소비전력을 구하여[6,7] 각 루프별 전류의 흐름과 전압강하를 계산하였다. 그림 7은 열차의 거리별 속도를 나타낸다.

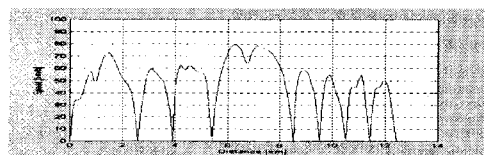


그림 7 구간내 운행 열차의 속도  
Fig. 7 Velocity of train in supply section

열차의 견인력을 최대한으로 하기 위해 차량은 10량으로 구성하였으며 승객도 만 차를 기준으로 계산하였다. 그림 8은 열차의 전력을 나타내며, (+)는 소비전력을 (-)는 회생전력을 나타낸다. 그림 9는 열차의 위치별 전력에 따라 열차전압도 진동하는 모습을 확인할 수 있다.

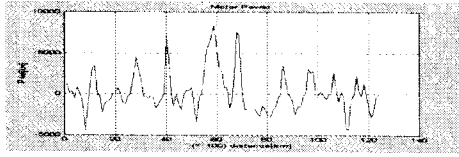


그림 8 열차의 전력 곡선  
Fig. 8 Real power curve of train

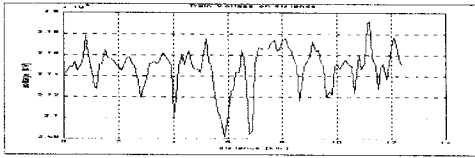


그림 9 거리별 열차전압  
Fig. 9 Train voltage on distance

### 3.2 다수열차 운행시 계통 해석

다수열차의 경우 그 비교 사례를 찾기 어려워 예제 계통은 AT의 특성을 자세히 파악하기 위해 구간내 4개의 AT를 설치한 48[km] 구간을 모의하였다. 전원단-AT, AT상호의 이격 거리는 각각 12[km]이며 선로조건(구배, 곡선)은 생략하였으며 열차조건도 정속도로 가정하였다.

#### 3.2.1 열차 위치별 계통의 전압분포

그림 10는 열차가 18[km]와 42[km] 지점에 위치하고 있는 경우이다.

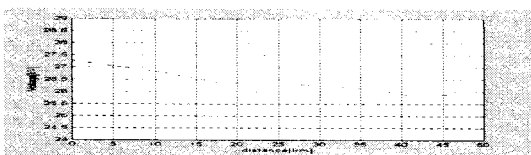


그림 10 18, 42[km] 지점 열차 위치시 계통전압  
Fig. 10 System voltage by distance (train on each 18, 47[km] position)

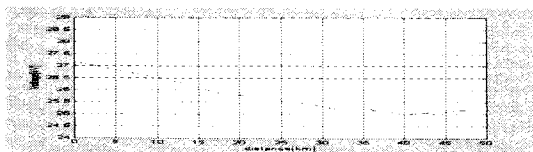


그림 11 18, 32, 40[km] 지점 열차 위치시 계통전압  
Fig. 11 System voltage by distance (Train on each 18, 32, 40[km] position)

그림 11은 계통 내에 3대의 열차가 각각 18, 32, 40[km]에 위치한 경우이다. 1대와 2대가 각각 운행 될 때의 그래프와 비교할 때 전원단 임피던스의 영향으로 전압강하 폭이 심해짐을 파악할 수 있다.

## 4. 결 론

본 논문에서는 AT 교류 급전 계통 내에 다수의 열차 운전 시 계속적으로 변하는 열차의 전압을 계산하기 위한 알고리즘을 제안하였다. 본 논문에서는 급전계통의 임피던스를 구하고, 간이형 TPS에서는 기계적인 입력을 전력으로 환산하였고, 계통의 해석을 위해 급전계통의 등가회로를 작성하였으며, 등가임피던스  $Z_1, Z_2, Z_3, Z_4$  값을 구하였다. 등가회로에서 열차는 정전류원으로, AT는 정전압 원으로 취급하였고 모의 계통에 적용하여 정확한 값을 얻을 수 있었다. AT의 특성상 열차의 전류가 AT의 상하로 분류하게 되는데 분류의 기준이 되는 회로를 알아보기 위하여 귀환전류와, 순환전류에 대한 특성을 살펴보았다. 순환전류에 의한 임피던스를 가지고 열차전류의 분배를 결정함이 타당성을 가지게됨을 입증하였다. 제안된 사례연구에서 열차의 위치별로 간단한 식에 위해서 열차 전압을 구하는 해석 방식을 제안하였고, 계통전압 분포를 확인하였다. 또한 전차의 대수, 전차의 위치변화에 따라 언제든지 열차 전압의 계산이 가능한 대수 방정식을 일반화된 형식으로 유도하였으며 다수의 열차 운행시 열차의 상호 작용을 고려한 계통 전체 전압 분포를 도출하는 방법을 제시하였고 이를 합산하여 다량 열차의 해석을 도모하였다. 그 결과 계통 내 전류의 흐름과 계통전체의 전압을 파악할 수 있었으며 이를 통하여 해당 조건에 따라 열차 운행 시 정확한 열차의 상태를 파악할 수 있었다. 이를 기존의 계통과 신설되는 계통에 적용하여 변전소의 위치 선정 및 AT변압기의 설치간격 등 기본적인 철도계통의 설계와 운영에 높은 신뢰성의 자료를 제공하도록 할 수 있을 것이다. 이후의 연구 과제로는 제안된 등가회로에 의한, 해석 방식에 의한 결과를 실제 전차선로에서 실측된 자료들과 비교를 할 수 없다는 것이 큰 단점이므로 정확한 비교를 할 수 있는 연구가 수행되어야한다. 또 전차선로를 해석하기 위하여 전차에서 사용되는 전동기의 종류, 전동기의 특성, 이동하면서 발생하는 여러 상황 등에 대한 자료나 연구결과를 이용한 동태해석과, 정상상태에서 벗어나 과도상태까지 해석하는 방법 개발 및 해석 시뮬레이터의 개발이 필요하다. 이를 이용하여 실제 전차선로와 유사한 결과를 도출하는 정밀한 시뮬레이터를 개발하는데 바탕이 되리라 사료된다.

#### [참 고 문 헌]

- [1] 조연옥 외 "도시철도차량 표준화·국산화 연구개발(III)", 제 2회 철도연구성과 발표논문집, pp. 13-33, 1998.
- [2] 김양수, 유해출, 전기철도공학, 동일출판사, 1996.
- [3] 철도청, 경부선 동대구-부산간 전철, 전력설비 기본설계 보고서 (별편), 1998
- [4] J. D. Glover, A. Kusko, S. M. Peeran, "Train Voltage Analysis for AC Railroad Electrification", IEEE, IASS2:ISA, pp. 207-216, 1982
- [5] 철도청, 전류 MAP을 이용한 전차선로 관리시스템 구축 연구,
- [6] 한성호, "열차성능 시뮬레이터 프로그램 개발 연구", 대한전기학회 하계 학술대회 논문지, 1998.
- [7] 전용주, 추동욱, 김재철의 2 "AT 교류 철도급전계통 내 다수 열차 운행시 새로운 계통해석 알고리즘 연구" 한국철도학회 추계학술대회논문집, 2000년 11월