

# 전기철도 교류급전 시스템의 회로 모델링 및 해석기법 연구

## A Study on Electric Circuit Modeling and Analysis for AC Railway System

창상훈<sup>1</sup>, 김주락<sup>2</sup>, 홍재승<sup>3</sup>, 오광해<sup>4</sup>, 김정훈<sup>5</sup>

Sang-Hoon Chang, Joorak Kim, Jae-Seung Hong, Kwang-Hae Oh, Jung-Hoon Kim

**Keywords** : electric railway system(전기철도), electric circuit modeling(전기회로 모델링),  
load modeling of locomotive(동력차 하중모델링), circuit analysis(회로해석),  
Gauss method(가우스법)

### Abstract

This paper presents an advanced approach to simulate AC electric railway system in steady-state. The algorithm consists of two parts. One is circuit modeling of elements of electric railway system, the other is an analysis on electric circuit. The modeling procedure has two steps, in the first step, proposed is the modeling method which is considered to be an internal impedance of the autotransformers and mutual impedances between the feeding systems. For the load(locomotives) modeling which is the second step, improved results are obtained as application to the proposed constant power model compared with constant impedance model. In the analysis on electric circuit, a generalized analysis method using the loop equation has been proposed and there is no limit in the number of trains between the ATs. In addition, the computer simulation by the proposed model was practiced. Simulation result seems very reasonable. It is therefore concluded that techniques for the electric circuit modeling and analysis have been established. Accuracy of the techniques will be further investigated.

### 1. 서 론

1970년대에 산업의 발달은 수도권 지역의 인구밀집 현상을 초래하여 도시교통이 혼잡하게 되었고, 도시간의 빠르고 정확한 운송이 필요하게 되었다. 이에 따라 지중화 및 고속화에 강점

을 갖는 전기철도가 도입되었고, 현재도 수도권 지역의 지하철 건설 및 확장이 진행 중에 있다. 이와 같은 설비투자 이외에도 수송능력을 증가시키기 위하여 전기차 운행회수의 증가와 차량의 대용량화가 추진되고 있으며, 이로 인해 결국 차량의 부하전류가 증가하는 불가피한 문제가 발생하였다. 또한 전기차는 급전계통에서 보편 이동과 정지를 반복하는 집중부하이므로 전기적 변화가 매우 심하고, 한 급전구간에 여러 편성의

\*1 정회원. 한국철도기술연구원 책임연구원

\*2 정회원. 한국철도기술연구원 연구원

\*3 비회원. 인택전기전자(주) 연구원

\*4 정회원. 한국철도기술연구원 선임연구원

\*5 정회원. 홍익대학교 전자전기공학부. 교수

차량이 운행할 때 차량간의 상호영향으로 전기적 특성이 수시로 변하는 특징을 가지고 있다. 따라서 급전계통에서 나타나는 현상을 정확히 분석하기 위해서는 전기적 특성분석과 함께 열차의 견인력, 운전특성 및 운행 스케줄, 선로상태 등을 고려한 종합적인 해석이 필요하다. 이러한 전기철도 급전계통 해석 시뮬레이션은 급전설비의 신규 건설시 용량결정뿐만 아니라 기존 시스템의 열차운용 계획의 변경시 최적의 계획을 세울 수 있으며, 전력 소모량의 변화와 계통 측면에서 공급 가능성의 여부를 검토하는데 사용된다.

이와 같은 전기철도 급전계통 해석에 대한 연구는 철도 선진국을 중심으로 수행되어 왔다. 그 중 J. D. Glover[1]는 주파수, 대지 저항률, 급전선과 귀선의 위치 등을 입력으로 전차선의 임피던스를 계산한 후, 전차선로를 T 등가회로로 변환하여 여러 대의 전차전압을 계산하였다. 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, 전차선로 계획을 위한 변전소와 단권변압기의 최적 가격 등을 구할 수 있는 장점이 있으나, 전차선로에 주안점을 두고 회로모델을 구성하였기 때문에 3상 전원계통에서 나타날 수 있는 여러 가지 현상을 다루지 못하였고, 한 대의 열차에 대한 평균값을 근거로 근사적인 방법으로 전압강하를 해석하여 타당성을 인정받기 부족하였다. 또한 위와 같은 해석방법들은 레일의 전위가 "0"이라는 가정하에 전차의 위치에 따라 전류가 분배되는 방법을 이용하였으나, 실제 전차선로에서는 레일의 전위가 존재하기 때문에 정확한 해석방법이라 할 수 없다.

이에 본 논문에서는 기존의 해석기법들이 부족했던 점을 보완하여 좀더 정교한 전기철도 급전계통 해석을 도모하고자 한다. 즉, AT 급전방식 하에서의 변압기의 내부 임피던스, 전차선, 급전선, 레일간의 상호 임피던스를 고려하여 전차선로의 회로 모델링을 구현하였고, 하나의 급

전구간 내에서 운행하는 열차의 수에 관계없는 일반적인 회로 해석법을 제안한다. 또한 전차량을 정 임피던스 및 정전력 모델로 모델링하여 각 방법을 비교 검토하여 정확한 해석 방법론 및 결과를 도출하고자 한다. 이와 같이 구현된 모델을 통해 수치해석 중 Gauss법을 도입하여 각 구성요소의 모델링 및 전압강하 해석기법의 정교함을 입증하고자 한다.

## 2. 전기철도 급전 시스템의 회로 모델링

전기철도에서는 차량의 소비전력이 크고 전압강하 문제와 함께 전철 변전소의 입지선정 및 건설비 문제 등으로 인해 변전소의 공급거리를 연장시키는 수단으로 전차선로에 단권변압기를 사용하는 AT 급전방식이 유리하다. 이 방식에서 변전소의 급전전압은 차량 사용전압의 2배가 되기 때문에 전압강하가 경감되어 변전소간의 거리를 길게 할 수 있다. 또한 귀환전류가 단권변압기를 통하여 피더로 흐르기 때문에 통신선에의 유도장해를 경감시킨다. 이러한 이유로 최근 신설 전철구간과 경부 고속철도에 이 방식이 적용되고 있다[3]. 이에 본 논문에서도 AT 급전방식을 채택한 교류 급전구간의 회로 모델링과 해석기법에 대해 검토하고자 한다.

전기철도 급전 시스템을 해석하는데 있어 가장 먼저 선행되어야 할 것은 시스템을 구성하고 있는 각 구성요소의 회로 모델링이다. 전기철도 급전 시스템의 구성요소란 한전의 3상 교류전력을 받아 스코트 변압기를 통해 2상으로 변환하는 전원계통, 단권변압기, 전차선로 등이다. Fig. 1은 AT 급전 시스템의 구성을 나타낸 것이다.

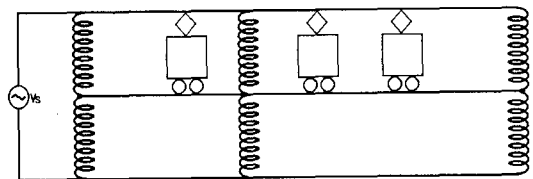


Fig. 1 Diagram of AT Feeding System

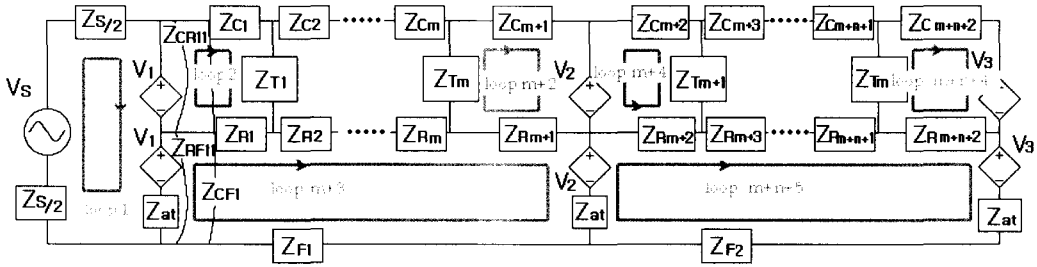


Fig. 2 Generalized Electric Circuit Model of AT Feeding System

Fig. 1과 같은 급전 시스템을 Fig. 2와 같이 한 급전구간 내에 열차 수에 제한없이 해석이 가능한 일반적인 형태로 구성되는 전기회로의 등가는 다음과 같다.

2.1 전차선로 모델링

AT 급전방식의 전차선로는 차량에 전력을 직접 공급하는 전차선과 레일 그리고 귀환전류를 변전소로 유인하는 급전선 등 3가지 도체군으로 구성되어 있다. 전차선 도체군은 전차선과 조가선으로 이루어지고 레일 도체군은 레일, 접지 케이블, 가공 보호선, 대지회로 등으로 이루어진다. 이들 각 도체들은 자체의 임피던스 뿐만 아니라 도체간에 작용하는 상호 임피던스도 포함하고 있다. 따라서 전차선로의 회로모델은 전차선, 레일 및 급전선의 자기 임피던스와 전차선과 레일간, 레일과 급전선간, 전차선과 급전선간의 상호 임피던스로 등가화될 수 있다. Fig. 3은 전차선로의 회로 등가모델을 표현한 것이다. 분포정수 회로로 표현되는 전차선로의 각 도체의 임피던스를 집중정수 회로로 표현한 것이다.

2.2 전기차 모델링

전기철도는 전력시스템 측면에서 보면 전기에너지 소비하는 하나의 부하로 표현된다. 최근 전력시스템에서는 기존의 단순한 부하의 표현으로서 안정도 해석과 조류계산의 결과의 신뢰성

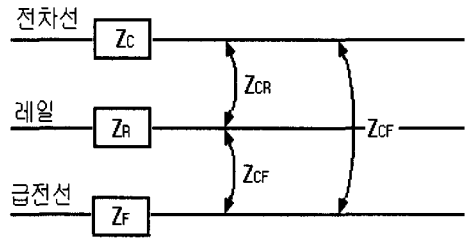


Fig. 3 Modeling of Self and Mutual Impedance of Feeding Lines

이 떨어진다는 연구 결과에 의해 시스템의 전압과 주파수에 따라 변화하는 부하전력의 수식적 모델링에 대한 연구가 수행되었다[4-6]. 따라서 전차선로의 해석에서도 전동기에 의해 구동되는 전기차의 특성과 현상을 정확하게 반영한 회로 모델을 구현하는 것이 보다 정밀한 시스템 해석에 도움이 될 것이다. 전력 시스템에서 부하의 정식화된 수식적 모델링으로는 ZIP 모델, 지수함수 모델, 다항식 모델 등이 있으나 물리적인 개념이 확실하여 가장 많이 사용되어 왔고, 전기차의 모델링에도 가장 적합한 것으로 판단되는 ZIP 모델을 차량의 부하적 특성을 나타내는 데 이용하기로 한다. ZIP 모델에 대한 수식은 식 (1) ~ (3)과 같다.

$$P = K_p \quad : \quad \text{정전력 모델} \quad (1)$$

$$P = K_V V \quad : \quad \text{정전류 모델} \quad (2)$$

$$P = K_V V^2 \quad : \quad \text{정 임피던스 모델} \quad (3)$$

### 2.2.1 정 임피던스 모델

본 절에서는 전기차를 일정한 임피던스 값을 가지는 부하로 등가화한다. 정 임피던스로 차량을 모델링하는 것은 계산의 편리함 즉, 차량 양단의 전압을 구할 때 반복적인 계산 수행 없이 임피던스 행렬의 역행렬을 구함으로써 해를 쉽게 찾을 수 있는 장점이 있기 때문이다. 또한 테브난 등가회로로 시스템을 변환하여 해를 찾고자 할 때에도 정 임피던스 모델로 차량의 모델을 구현해야만 접근할 수 있다.

### 2.2.2 정전력 모델

ZIP 모델에는 식 (1)에서와 같이 정전력, 정전류, 정 임피던스, 복합 모델 등이 있으나, 여기서는 식 (1)의 정전력 모델을 사용한 차량 모델링에 대해 언급하기로 한다. 전기차의 부하적 특성은 정태적인 부하가 아닌 시간에 따라 변화하는 동태부하이지만, 운행 스케줄에 의해 전구간에서 운전속도가 규정되어 있어서 일정 위치에서는 항상 동일한 전력을 소비하고, 역률 또한 1에 가까운 값을 가지는 정전력 부하이기 때문이다. 또한 전동기가 전기적 출력을 일정하게 유지하려 한다는 특성을 반영하기 위해서도 전기차의 소비전력을 일정 값으로 모델링하는 정전력 모델을 도입하는 것이 타당할 것이다.

전기차의 소비전력은 표준 운전선도를 통해 운행차량의 출발 및 도착시간을 알 수 있으며, 이것을 기반으로 역행 및 회생전력을 구할 수 있다. 또한 급전 시스템 해석 계산시에는 전기차의 소비전력과 전압의 초기값을 이용하여 전차의 임피던스를 구하게 되며 반복계산을 통하여 전차의 전압을 구하게 된다.

## 3. 급전회로 해석기법

전차선로를 해석하기 위하여 적용한 두 방법은 페루프 해석법과 마디해석법이다. 또한 전차

의 대수에 따라 각 루프 및 마디의 수식이 유사한 형태로 나타나는 것을 알 수 있다. 이를 통해 연관성을 도출하면 일반화된 식으로 표현할 수 있다.

### 3.1 페로 해석법

Fig. 2의 각 페루프에 KVL을 적용하여 수식을 정리하면 다음과 같다. 단, 전기차는 정 임피던스 부하로 가정한다. 여기서, m은 첫번째 구간 의 전기차의 대수이다.

1) loop 1에 KVL을 적용한 식은 항상 다음과 같다.

$$V_s = Z_s I_1 + 2V_1 + Z_{at}(I_1 - I_{m+3}) \quad (4)$$

2) 첫번째 단권변압기 구간

i) loop 2에 KVL을 적용하면 다음과 같다.

$$V_1 = (Z_{C1} + Z_{R1} - 2Z_{CR1} + Z_{T1})I_2 + (-Z_{T1})I_3 + (-Z_{R1} + Z_{CR1} - Z_{CF1} + Z_{RF1})I_{m+3} + V_2 \quad (5)$$

다만, 전차가 한 대도 없다면  $Z_{T1} = 0$ 이며, 전차가 존재한다면  $V_2 = 0$ 이다.

ii)  $m \geq 1$ 인 경우, loop (m+2)의 수식은 식 (6)과 같다.

$$0 = (-Z_{Tm})I_{m+1} + (Z_{C(m+1)} + Z_{R(m+1)} - 2Z_{CR(m+1)} + Z_{Tm})I_{m+2} + (-Z_{R(m+1)} + Z_{CR(m+1)} - Z_{CF(m+1)} + Z_{RF(m+1)})I_{m+3} + V_2 \quad (6)$$

iii)  $m \geq 2$  경우 loop 3 ~ loop (m+1) 사이 k번째 페로의 수식은 다음과 같다.

$$0 = (-Z_{T(k-2)})I_{k-1} + (Z_{C(k-1)} + Z_{R(k-1)} - 2Z_{CR(k-1)} + Z_{T(k-2)} + Z_{T(k-1)})I_k + (-Z_{T(k-1)})I_{k+1} + (-Z_{R(k-1)} + Z_{CR(k-1)} - Z_{CF(k-1)} + Z_{RF(k-1)})I_{m+3} \quad (7)$$

iv) (m+2)번째의 폐로의 일반식은 식 (6)과 같으며, 레일-급전선 간에 발생하는 폐로 loop (m+3)의 식은 다음과 같다.

$$V_1 = \left\{ \left[ \sum_{k=1}^{m+1} (Z_{Rk} - 2Z_{RFk}) \right] + Z_{F1} + 2Z_{at} \right\} I_{m+3} - Z_{at}(I_1 + I_{m+n+5}) + \sum_{k=1}^{m+1} [(-Z_{Rk} + Z_{CRk} - Z_{CFk} + Z_{RFk})I_{k+1}] + V_2 \quad (8)$$

3) 두번째 단권변압기 구간

n대의 전기차가 두번째 단권변압기에 존재한다고 가정을 하고 첫번째 단권변압기와 같은 방법으로 해석을 할 수 있으며, 폐로의 번호는 (m+4)부터 시작한다. 두번째 단권변압기 구간에 첫번째 폐로에 관한 일반식은 다음과 같다.

i) loop (m+4)에 KVL을 적용하면 다음과 같다.

$$V_2 = (Z_{C(m+2)} + Z_{R(m+2)} - 2Z_{CR(m+2)} + Z_{T(m+1)})I_{m+4} + (-Z_{T(m+1)})I_{m+5} + (-Z_{R(m+1)} + Z_{CR(m+1)} - Z_{CF(m+1)} + Z_{RF(m+1)})I_{m+n+5} + V_3 \quad (9)$$

다만, 전차가 존재하지 않는다면  $Z_{T(m+1)} = 0$  이 된다.

ii)  $n \geq 2$ 인 경우 loop (m+5) ~ loop (m+n+3) 사이 j번째 구간의 수식은 다음과 같다.

$$0 = (-Z_{T(j-4)})I_{j-1} + (Z_{C(j-2)} + Z_{R(j-2)} - 2Z_{CR(j-2)} + Z_{T(j-4)} + Z_{T(j-3)})I_j + (-Z_{T(j-3)})I_{j+1} + (-Z_{R(j-2)} + Z_{CR(j-2)} - Z_{CF(j-2)} + Z_{RF(j-2)})I_{m+n+5} \quad (10)$$

iii) loop (m+n+4)는 전차가 1대 이상 존재하면 전기차와 단권변압기가 만나는 폐로이다.

$$0 = (-Z_{T(m+n)})I_{m+n+3} + (Z_{C(m+n+2)} + Z_{R(m+n+2)} - 2Z_{CR(m+n+2)} + Z_{T(m+n)}) \times I_{m+n+4} + (-Z_{R(m+n+2)} + Z_{CR(m+n+2)} - Z_{CF(m+n+2)} + Z_{RF(m+n+2)})I_{m+n+5} + V_3 \quad (11)$$

iv) loop (m+n+5)는 레일과 급전선간에 형성되는 폐로이며, 수식은 다음과 같다.

$$V_2 = \left\{ \left[ \sum_{j=m+2}^{m+n+2} (Z_{Rj} - 2Z_{RFj}) \right] + Z_{F2} + 2Z_{at} \right\} \times I_{m+n+5} - Z_{at}I_{m+3} + \sum_{j=m+2}^{m+n+2} [(-Z_{Rj} + Z_{CRj} - Z_{CFj} + Z_{RFj})I_{j+2}] + V_3 \quad (12)$$

4) 각 루프전류 관계식

$$2I_1 - I_2 - I_{(m+3)} = 0 \quad (13)$$

$$I_{(m+2)} + I_{(m+3)} - I_{(m+4)} - I_{(m+n+5)} = 0 \quad (14)$$

$$I_{(m+n+4)} + I_{(m+n+5)} = 0 \quad (15)$$

이상과 같이 일반식은 m+n+5개의 식으로 구성되며, 행렬로 나타내면 다음과 같다.

$$\begin{bmatrix} V_s \\ 0 \\ 0 \\ \vdots \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Z_1 & 0 & \cdots & -Z_{at} & 2 & -1 & 0 \\ 0 & Z_2 & \cdots & 0 & -1 & 0 & 0 \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ 0 & 0 & \cdots & Z_k & 0 & -1 & 1 \\ 0 & 2 & -1 & \cdots & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \cdots & -1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \cdots & -1 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_1 \\ I_2 \\ \vdots \\ I_{m+n+5} \\ V_1 \\ V_2 \\ V_3 \end{bmatrix} \quad (16)$$

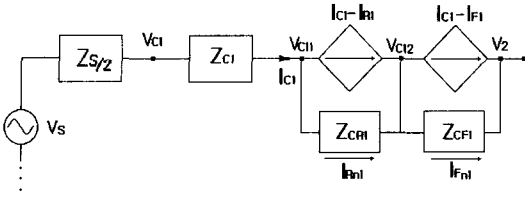
$$y = [A] \cdot x \quad (17)$$

여기서, y는 (m+n+8)×1 벡터로 전철용 변전소에서 공급되는 전압이 포함되고, [A]는 (m+n+8)×(m+n+8) 행렬로 임피던스 및 어드미턴스 성분이 포함되어 있다. x는 구하고자 하는 해로 (m+n+8)×1 벡터이다.

정 임피던스모델로 차량을 구현한 위와 같은 수식과 같이 정전력 모델의 경우도 정식화할 수 있으며, 정전력 모델의 경우 위 수식에서  $Z_T$ 를  $V_T^2/S_T^*$ 로 변환하여 해석한다.

3.2 마디 해석법

마디해석법을 적용하기 위해서 모든 급전회로의 상호 임피던스를 다음과 같이 처리하였다. 상호 임피던스에 의하여 발생하는 전압강하를 종속 전압원으로 표시한 후 다시 Fig. 4와 같이 전차선을 종속 전류원과 임피던스로서 표현하였다. 아울러 레일과 급전선의 경우도 Fig. 4와 같은 형태로 나타낼 수 있다.



**Fig. 4 Representation of Mutual Impedance**

Fig. 4에 KCL을 적용한 회로 방정식은 다음과 같다.

$$\frac{V_S - V_{C1}}{Z_{S/2}} - \frac{V_{C1} - V_{C11}}{Z_{C1}} = 0 \quad (18)$$

$$\frac{V_{C1} - V_{C11}}{Z_{C1}} - \frac{V_{C11} - V_{C12}}{Z_{Cr1}} = I_{C1} - I_{R1} \quad (19)$$

$$\frac{V_{C12} - V_2}{Z_{Cf1}} = (I_{C1} - I_{R1}) - (I_{C1} - I_{F1}) \quad (20)$$

물론, 레일과 급전선에서도 식 (18) ~ (20)과 유사한 형태의 방정식을 얻을 수 있다.

첫번째 단권변압기 구간에 m대, 두번째 단권 변압기 구간에 n대가 있다고 가정하면, 마디해석법을 사용할 경우 미지수의 개수는 (8m+8n+21)개가 된다. 결국 식 (18) ~ (20)과 같이 각 마디의 전압을 미지수로 표현하는 것이 가능하므로 다음과 같은 행렬식을 세울 수 있다.

$$\begin{bmatrix} V_S/Z_S \\ 0 \\ \vdots \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Y_{11} & Y_{12} & \cdots & Y_{1(n-1)} & Y_{n1} \\ Y_{21} & Y_{22} & \cdots & Y_{2(n-1)} & Y_{n2} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots & \vdots \\ Y_{1(n-1)} & Y_{2(n-1)} & \cdots & Y_{(n-1)(n-1)} & Y_{n(n-1)} \\ Y_{1n} & Y_{2n} & \cdots & Y_{(n-1)n} & Y_{nn} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_1 \\ I_2 \\ \vdots \\ I_2 \\ V_3 \end{bmatrix} \quad (21)$$

이를 행렬과 벡터로 표시하면 식 (22)가 된다.

$$I = [Y] V \quad (22)$$

식 (22)로부터 전차선로의 전압을 계산할 수 있다. 그러나 마디해석법으로 해석하는 경우 미지수의 개수가 폐로해석법의 경우보다 많다는 단점은 있다.

### 3.3 급전회로 해석

회로모델로 등가화된 급전계통의 해석은 단권 변압기 한 구간에 전기차 수에 따라 미지수 및 식의 개수가 변하는 방정식의 해를 구하는 문제이다. 만약 전기차의 대수가 M이라면 미지수, 방정식 모두 M+5개로 표현된다. 구하고자 하는 해 즉, 각 폐로의 전류와 차량의 전압을 구하는 방법은 다음과 같다.

#### 3.3.1 정 임피던스 모델

정 임피던스 모델의 경우 선로 및 전기차의 임피던스 값들이 입력되면, 행렬 [A]가 구성되고, 원하는 해를 찾기 위해서는 행렬 [A]의 역행렬을 구하는 과정이 필요하다. 역행렬을 구하는 방법으로는 Gauss 소거법, cramer's rule 등으로 구할 수 있으나, 본 논문에서는 matlab 내장함수를 이용하여 행렬 [A]의 역행렬을 구하는 방법을 사용한다.

#### 3.3.2 정전력 모델

정전력 모델의 경우 차량의 부하전력이 일정하므로 전기차의 임피던스와 전압을 반복적인 계산으로 찾아야 한다. 이러한 문제의 해를 찾기 위해서 수치해석기법 중 Gauss법을 이용한다. 특히 Gauss법은 해의 안전성이 보장되는 장점이 있으며, 본 문제에 가장 적합한 방법이라고 사료된다. 식 (23)은 Gauss법의 기본 형태이다.

$$x = f(x) \quad (23)$$

식 (22)와 같은 Gauss법에 정식화된 전기철도 급전계통 해석문제를 적용하는 것은 다음과 같다. 전기차가 소비하는 전력이 식 (4) ~ (6)으로 계산되기 때문에, 전기차 양단 전압의 초기치를 지정하여 반복계산으로 해를 구하게 되면 전기차의 모든 전기량을 계산할 수 있게 된다. 따라서 미지수 x는 전기차에 걸리는 전압 V1로 적용

된다. 식 (24)는 페로해석법을 이용하여 정리한 수식이다.

$$\begin{aligned}
 f_1(I_{Loop1}, I_{Loop2}, \dots, I_{Loopn}, V_{T1}, V_{T2}, \dots, V_{TM}) &= V_S \\
 f_2(I_{Loop1}, I_{Loop2}, \dots, I_{Loopn}, V_{T1}, V_{T2}, \dots, V_{TM}) &= 0 \\
 &\vdots \\
 f_n(I_{Loop1}, I_{Loop2}, \dots, I_{Loopn}, V_{T1}, V_{T2}, \dots, V_{TM}) &= 0
 \end{aligned} \tag{24}$$

위 식을 이용하여  $I_{Loop1} \sim I_{Loopn}$ 를 구하여 전기차에 걸리는 전압을 계산하여 전기차에 걸리는 전압과 비교를 한다. 여기서 설정한 오차보다 크면 계산을 다시 수행하게 된다. Fig. 5는 정전력부하를 적용한 급전회로를 해석하기 위한 계산 흐름도이다.

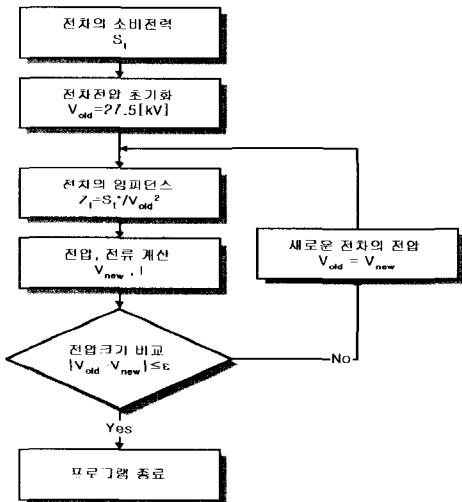


Fig. 5 Calculation Flow for Constant Power Model

#### 4. 사례연구

앞에서와 같이 제안한 전기철도 교류급전시스템의 회로 모델링과 해석기법의 정당성을 검증하기 위하여 현재 운행중인 안산선을 대상으로 사례연구를 수행하였다.

#### 4.1 입력자료

전기철도의 급전계통을 증가화한 회로에 사례 시스템을 적용하기 위한 각 임피던스 및 소비전력값은 다음과 Table 1 및 2와 같다. 전차의 위치와 소비전력을 계산하기 위하여 정차시간은 20 초, 운행간격은 2 분으로 설정하여 계산하였다. 따라서 500 초 후의 전차의 위치와 전차의 소비전력은 Table 2와 같다. 또한 전차의 총 중량은 견인력을 최대로 하기 위하여 10량 구성, 승객이 만차인 경우를 기준으로 한 559 ton으로 선정하였다. 이 때, 전차는 두번째 단권변압기와 세번째 단권변압기 사이에 존재하며, 세번째의 전차는 회생제동에 해당된다. 대상 시스템을 전기회로로 증가화한 구성도는 Fig. 6과 같다.

Table 1 Impedances of Test System

종류	크기	단위
전원임피던스( $Z_S$ )	2.36+j19.5	[ $\Omega$ ]
AT 내부임피던스( $Z_{at}$ )	0.0287+j0.4491	[ $\Omega$ ]
전차선 임피던스( $Z_C$ )	0.194+j0.731	[ $\Omega$ /km]
레일 임피던스( $Z_R$ )	0.009+j0.467	[ $\Omega$ /km]
급전선 임피던스( $Z_F$ )	0.122+j0.587	[ $\Omega$ /km]
전차선-레일 임피던스( $Z_{CR}$ )	0.053+j0.373	[ $\Omega$ /km]
전차선-급전선 임피던스( $Z_{CF}$ )	0.051+j0.361	[ $\Omega$ /km]
레일-급전선 임피던스( $Z_{RF}$ )	0.058+j0.369	[ $\Omega$ /km]

Table 2 Location and Consumed Power of Trains

전차	위치[km]	유효전력[kW]	무효전력[kvar]
Train 1	16.0	5105.651	720.240
Train 2	17.2	1788.615	252.315
Train 3	18.3	-831.676	-117.322

#### 4.2 결과 분석

##### 4.2.1 정 임피던스 모델 해석 결과

Table 3은 차량의 전기적 부하특성을 정 임피던스 모델로 모델링한 경우의 급전시스템 해석

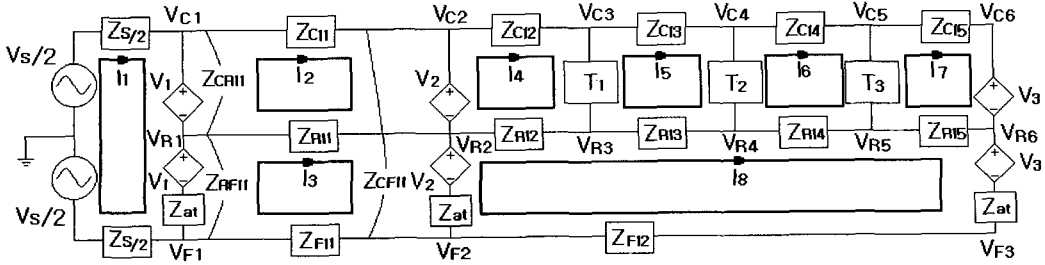


Fig. 6 The Electric Circuit Equivalent Model for Case Studies

결과이다. 이때 전차의 임피던스 값은 187.17 Ω 이다. Fig. 7은 단권변압기와 전차 세대의 양단에 걸리는 전압을 나타낸 것으로 Fig. 8에서와 같이 첫번째 단권변압기의 전압값이 가장 높고 거리가 따라 전압강하가 일어남을 알 수 있다.

같다. 각 전차 전압의 초기값은 27.5 kV로 가정 하였으며, 허용오차 이내로 3번의 반복계산 후에 수렴되었음을 Fig. 8을 통해 알 수 있다. 수렴속도 또한 짧아 정 임피던스 모델에 비해 계산속도 상의 문제는 없음을 알 수 있었다.

Table. 3 The Voltage Values of Each node for Constant Impedance Model

종류	크기[V]	위상각	종류	크기[V]	위상각	종류	크기[V]	위상각
V <sub>C1</sub>	27140	-2.12	V <sub>R1</sub>	3.3073	-142.51	V <sub>F1</sub>	27140	177.88
V <sub>C2</sub>	26934	-2.95	V <sub>R2</sub>	42.8647	-105.96	V <sub>F2</sub>	26966	177.30
V <sub>C3</sub>	26765	-3.53	V <sub>R3</sub>	33.5295	136.57	V <sub>F3</sub>	26822	176.62
V <sub>C4</sub>	26763	-3.53	V <sub>R4</sub>	28.4849	141.61			
V <sub>C5</sub>	26775	-3.47	V <sub>R5</sub>	19.6053	163.18			
V <sub>C6</sub>	26785	-3.44	V <sub>R6</sub>	17.2382	-165.85			

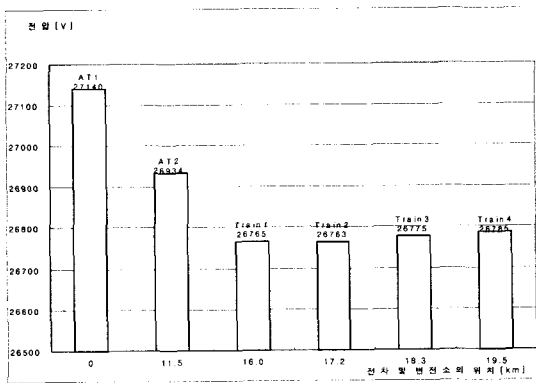


Fig. 7 Calculation result for Constant Impedance Model

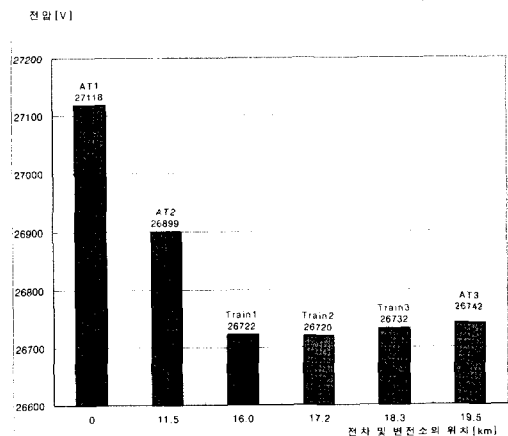


Fig. 8 Calculation result for Constant Power Model

#### 4.2.2 정전력모델 해석 결과

Fig. 6에 Table 1 및 2의 입력자료를 대입하여 전차선로 각 마디의 전압을 구하면 Table 4와

반복계산에 의한 단권변압기와 각 열차의 양단 전압은 Fig. 8과 같다.



Table 4 Voltage Values of Each Node for Constant Power Model

종류	크기[V]	위상각	종류	크기[V]	위상각	종류	크기[V]	위상각
V <sub>C1</sub>	27118	-2.23	V <sub>R1</sub>	3.4906	-142.71	V <sub>F1</sub>	27118	177.77
V <sub>C2</sub>	26899	-3.12	V <sub>R2</sub>	45.2403	-106.16	V <sub>F2</sub>	26933	177.15
V <sub>C3</sub>	26722	-3.73	V <sub>R3</sub>	35.3862	136.380	V <sub>F3</sub>	26781	176.43
V <sub>C4</sub>	26720	-3.72	V <sub>R4</sub>	30.0644	141.41			
V <sub>C5</sub>	26732	-3.66	V <sub>R5</sub>	20.6929	162.98			
V <sub>C6</sub>	26742	-3.63	V <sub>R6</sub>	18.1935	-166.06			

4.2.3 정전력/정임피던스모델의 결과 비교

양 모델의 계산결과를 살펴보면, 모델링 방법에 따른 전압의 차이가 0.19 ~ 43 V까지 발생하며, 레일에서 V<sub>R6</sub>의 경우 5.25 %의 오차가 발생함을 알 수 있다. Fig. 9는 두 방법에서 전기차 양단에 걸리는 전압을 나타낸다.

5. 결 론

본 논문은 전기철도 교류급전시스템의 시뮬레이터 구축을 위한 해석기법에 대한 연구로서, 급전시스템의 각 구성요소의 회로등가화를 통해 전기차 및 급전선로의 전압강하를 해석하였으며, 결론은 다음과 같다.

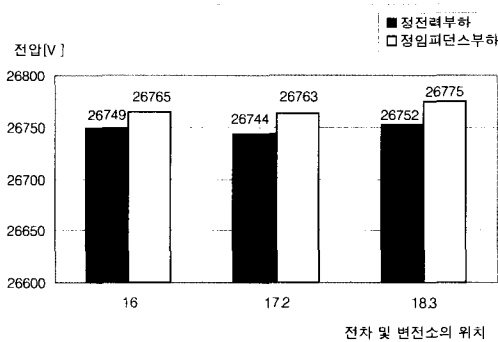


Fig. 9 Comparison of Calculation Results

정 임피던스 모델의 경우 전기차의 각 전압이 일정하여 필요한 전력소비를 위해서 가선에 흐르는 전류가 낮으나, 정전력 모델의 경우 전차선의 전압강하를 반영함으로써 가선전류가 크게 해석되는 특성이 있다. 실제 급전 상황에서도 가선에 의한 전압강하가 발생하기에 정전력 모델로 전기차를 모델링하는 것이 급전 시스템의 특성을 올바르게 반영한 것이라 하겠다.

- 급전 시스템 회로해석방법으로 폐회로 해석법과 마디해석법에 대한 수식을 정립하였다.
- 정 임피던스 모델 및 정전력 모델의 해석 결과 최대 5.25 %의 차이가 남을 알 수 있었으며, 반복계산 3번에 해를 찾음으로서 실시간 계산에도 무리가 없음을 알 수 있었다.
- 전기철도 교류급전시스템의 회로 모델링에 전원과 단권변압기의 내부 임피던스를 포함하여 해석결과와의 정교함을 피하였다.
- 급전시스템 해석시 차량의 부하모델링을 기존의 정임피던스 모델뿐 아니라 정전력모델에 대한 모델링 및 해석기법을 제안하였다.
- 전기차 부하를 정전력 모델로 표현함으로써 정 임피던스 모델의 경우보다 현실적인 결과를 얻을 수 있었다.

본 연구결과는 정태적인 방법으로 전차운행에 따른 급전계통의 전기량을 해석하는 알고리즘으로, 동특성 해석으로 확장시 초기치로 사용할 수 있을 것이다. 또한 고장상태, 과도상태 등에서의 급전계통을 해석하는 경우 전차의 모델링 및 해석에 초석이 될 것으로 사료된다.

## 후 기

본 논문은 한국철도기술연구원의 연구비 지원으로 이루어진 것입니다.

## 참 고 문 헌

1. J. D. Glover, A. Kusko, S. M. Peeran, "Train Voltage Analysis for AC Railroad Electrification", IEEE, IASS : ISA, pp. 207-216, 1982
2. R. J. Hill, I. H. Cevik, "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, 1993
3. 오광해, "전류 MAP을 이용한 전차선로 관리시스템 구축 연구", KRRRI 연구 99-22, 한국철도기술연구원, 1998
4. C. Concordia. "Representation of Loads", IEEE PES Winter Meeting 1975, Paper 75 CHO 970-4-PWR
5. General Electric Co., "Load Models for Power Flow and Transient Stability Computer Studies", EL-5003, Vol. 1-4, EPRI Project 847-7, 1987
6. Bong-Yong Lee, Jung-Hoon Kim, Keon-Bo Shim, "System Wide Load Models for Flows and Transient Stability in Korea's Power System", IEEE International Conference on Power System Technology, Vol. 1, pp. 183-188, Sept. 1991
7. Jun-Min Cha, Sang-Hoon Chang, Kwang-Hae Oh, "Assesment of Autotransformer-Fed Electric Traction systems Using Thevenin's Equivalent Circuit", ICEE98 Proceedings Vol. I, pp. 504-507, 1998
8. 홍재승, 김정훈, 김발호, 창상훈, "일반 회로해석법을 위한 전차선로 모델링 및 정교한 해석에 관한 연구", 대한전기학회 추계학술대회논문집, pp. 300-302, 1999
- [9] 김정훈, 김발호, 오광해, 창상훈, "정교한 전차선로의 회로 모델링 및 범용성 해석기법 개발" 대한철도학회 추계학술대회논문집, pp. 296-301, 1999