

# 단자망을 이용한 직류전기철도 해석방안에 관한 연구

## A Study on Analysis Method of DC Electric Railroad using Terminal Network Analysis

이 장 무\* · 장 동 옥\* · 김 재 원\* · 한 문 섭\* · 정 환 수\*\* · 김 주 락\*

(Chang-Mu Lee · Dong-Uk Jang · Jae-Won Kim · Mun-Seup Han · Hwan-Su Jung · Joo-Rak Kim)

**Abstract** - In order to analyze the power consumption pattern of the DC urban rail system, the method to obtain a solution establishing the current equation according to fixed position of the substation and varying position of the train is used. The proposed analysis method using the network analysis is to model the transfer function of the component constituting a direct current power supply system (dc substation, train, catenary) to the voltage and current. By multiplying the model formula consecutive, it can calculate the voltage and current of each element of power supply circuit and shows a simple case analysis.

**Key Words** : Urban railway, Power supply system, Modeling, Port network, Load flow

### 1. 서 론

전기철도시스템은 공급전력에 따라 직류급전시스템, 교류급전시스템으로 나누어지며, 국내의 고속철도 및 일반철도는 교류 25kVx2 AT급전시스템을, 도시철도는 DC1500V 급전시스템, 경량전철은 DC750V 급전시스템을 사용하고 있다.

이러한 전기철도 급전시스템에서 새로운 노선을 계획하거나 또는 기존의 열차가 운행하는 구간에서 열차운행의 증가가 필요할 때, 해당 구간의 열차 운행스케줄과 열차부하를 고려한 전력조류해석을 통해 철도변전소의 공급 전압/전류/전력, 변전소 설비 용량, 부하전류 차단기 정격, 안정적 열차운행을 위한 차량 집전전압 등을 검토하고 있다. 기존의 전력조류해석은 PSCAD/EMTDC와 같은 전력분야 해석을 위한 전용해석프로그램을 사용하거나 또는 전기철도 급전시스템을 등가화한 Node방정식을 수립하여 해를 구하는 방법을 사용하여 왔으며, 특히 단자망을 이용한 해석방법을 개발하여 교류급전시스템 해석에 사용하고 있다. PSCAD/EMTDC의 경우 고정된 회로요소에 대한 과도상태/정상상태 해를 구하는데 장점을 가지고 있으나, 철도시스템과 같이 시간에 따라 차량 부하의 크기와 위치가 급격히 변하는 회로의 해를 구하는데 어려움이 있으며, 급전시스템을 등가화한 Node방정식의 경우 변전소의 수(N)와 열차의 수(M)가 증가함에 따라 계산하는 node equation이 N+M차원으로 증가하는 문제점이 있다. 교류급전시스템은 단일 전압원으로 단자망을 이용한 해석방법 적용에 용이하나, 직류급전시스템은 다수의 전원이 전

차선을 통해 병렬로 구성되어 있고 선로의 양쪽 말단이 개방되어 있어 단자망 해석방법을 적용함에 난점을 가지고 있다.

본 논문에서 제안하는 단자망을 이용한 직류급전시스템 해석방법은 선로의 말단을 0전위의 전압과  $\infty$ 의 저항을 갖는 테브난 등가회로로 간주하고 직류급전시스템을 구성하는 각 구성요소(직류변전소, 차량, 선로)를 전압과 전류의 전달함수로 모델링하여 모델링된 각 구성요소를 연속으로 곱함으로써 급전회로의 각 요소의 전압과 전류 및 부하를 계산할 수 있으며, 이를 간단한 해석사례를 통해 보이고자 한다.

### 2. 직류급전시스템 모델링 및 해석사례

#### 2.1 직류급전시스템 모델링

일반적인 도시철도 직류급전시스템을 그림 1에 나타내었다. 직류급전시스템의 직류변전소는 한국전력으로부터 3상 22.9kV를 수전받아 변압기 및 정류기를 거쳐 직류1500V 또는 직류750V로 바꾸어 선로에 공급하며, 선로는 전차선과 레일로 구성되어 직류변전소 간을 병렬 연결하며 선로상의 차량에 전력을 공급한다. 선로상의 차량은 차량 양쪽의 직류변전소로부터 차량 운행에 필요한 전력을 공급받아 운행하게 된다. 이러한 직류급전시스템은 다수의 직류변전소, 직류변전소간을 병렬 연결하는 다수의 전차선로, 전차선로상의 다수의 차량과 급전시스템의 양쪽 말단으로 구성되며, 이러한 구성요소(직류변전소, 전차선로, 차량, 선로말단)를 전압과 전류의 전달함수로 모델링함으로써 직류급전시스템에 대한 해석을 수행할 수 있다. 특히 선로의 말단을 급전회로해석과 연계하기 위하여 0 전위의 전압과  $\infty$ 의 저항을 갖는 테브난 등가회로로 간주하여 모델링하며, 다수의 전원을 갖는 회로에 대해 단자망 기반의 일반화된 해석방법을 제안하였다.

† Corresponding Author : Korea Railroad Research Institute, Korea.

E-mail: jrkim@krrri.re.kr

\* Korea Railroad Research Institute, Korea.

Received : October 4, 2016; Accepted : October 24, 2016

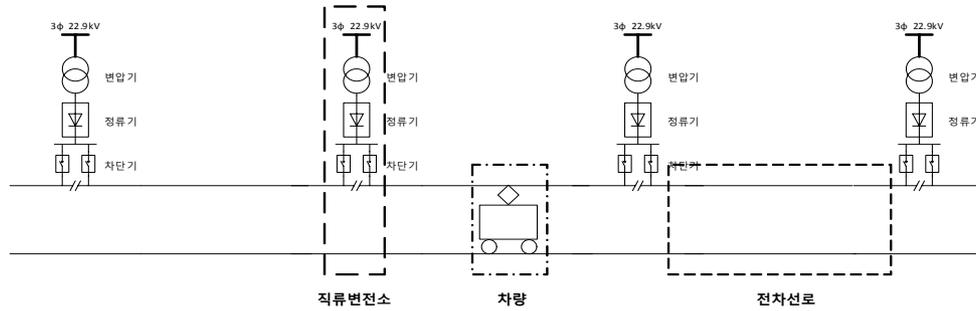


그림 1 도시철도 직류급전시스템

Fig. 1 DC power supply system

2.1.1 직류변전소 모델링

직류변전소는 그림 1과 같이 한국전력으로부터 3상 22.9kV를 수전받아 변압기와 정류기를 통하여 직류를 공급하고 있다. 이러한 직류변전소는 변전소의 좌측 및 우측의 선로에 전력을 공급하고 있으며 직류전압원과 등가임피던스를 갖는 테브난 등가회로로 표현할 수 있으므로 그림 2와 같이 등가모델로 나타낼 수 있으며 이를 전압과 전류의 전달함수로 표현하면 식 (1)과 같다.

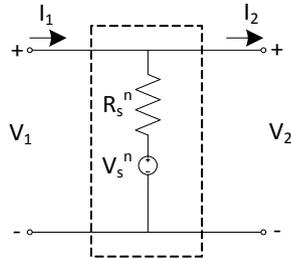


그림 2 DC전원모델

Fig. 2 DC power model

$$\begin{bmatrix} V_1 \\ I_1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ \frac{1}{R_s^n} & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_2 \\ I_2 \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} 0 \\ \frac{1}{R_s^n} \end{bmatrix} V_s^n \quad (1)$$

여기서,  $R_s^n$  : n번째 변전소의 등가임피던스

$V_s^n$  : n번째 변전소의 무부하전압

2.1.2 전차선로 모델링

도시철도구간의 직류전차선로는 전차선과 레일로 구성되며, 직류변전소로부터 전차선을 통해 차량으로 공급된 전류가 레일을 통해 변전소로 귀환하게 된다. 이러한 직류 전차선로는 그림 3과 같이 전차선의 저항성분과 레일의 저항성분을 갖는 등가모델로 표현할 수 있으며, 이를 전압과 전류의 전달함수로 표현하면 식 (2)와 같다.

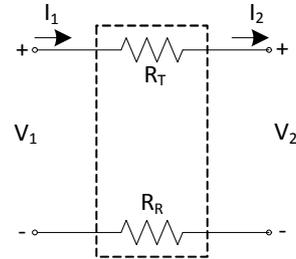


그림 3 전차선로 모델

Fig. 3 Catenary model

$$\begin{bmatrix} V_1 \\ I_1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & R_T + R_R \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_2 \\ I_2 \end{bmatrix} \quad (2)$$

여기서,  $R_T$  : 전차선로 임피던스

$R_R$  : 레일 임피던스

2.1.3 차량 모델링

도시철도구간을 운행하는 차량은 직류변전소로부터 운행에 필요한 전력을 전차선을 통해 공급받거나 또는 회생전력을 전차선으로 공급하기도 한다. 이러한 차량은 전력부하로 표현하여나 하나, 이에 대응하는 회로소자가 없으므로 저항부하로 표현하며 차량점의 전압과 함께 반복 계산하여 차량의 전력에 해당하는 저항으로 나타낼 수 있다. 이러한 차량은 그림 4와 같은 등가모델로 표현하며, 이를 전압과 전류의 전달함수로 표현하면 식 (3)과

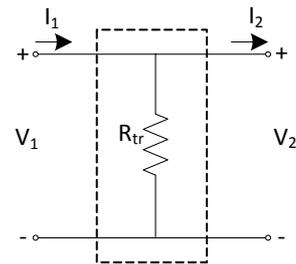


그림 4 차량모델

Fig. 4 Train model

같다.

$$\begin{bmatrix} V_1 \\ I_1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ \frac{1}{R_r} & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_2 \\ I_2 \end{bmatrix} \quad (3)$$

여기서,  $R_r$  : 차량의 등가 임피던스

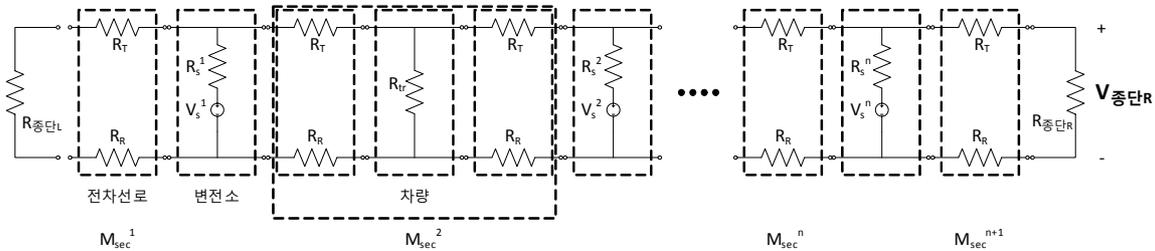
### 2.2 DC급전회로 해석

위의 2.1절에서 제안한 각 회로요소들에 대한 등가화된 전달함수 모델을 이용하여 그림 1의 도시철도급전시스템을 등가화 하면 그림 5와 같이 나타낼 수 있다.

그림 5와 같은 도시철도 직류급전시스템 등가화모델에서 맨 우측의  $V_{종단R}$ 을 제외한 모든 값은 주어진 상수임으로 그림 6에서 나타낸 바와 같이 좌측에서부터 우측으로 각 회로요소에 대한 전달함수를 직렬 연결하여 계산함으로써 회로의 해를 계산할 수 있다.

선로좌측말단부터 좌측 첫 번째 변전소 구간의 수식을 정리하면 식 (4)와 같다.

$$0 = M_{FR} \left[ M_{sec}^1 \left\{ M_{S1}^1 \begin{bmatrix} V_1^1 \\ I_1^1 \end{bmatrix} - M_{S2}^1 V_S^1 \right\} \right] \quad (4)$$



여기서  $R_{종단L}, R_{종단R}$  : DC급전선로 말단저항( $R=\infty$ ),  $M_{sec}^n$  : n번째 구간 전차선로 모델,  $V_{종단R}$  : DC급전선로 우측 말단 전압

그림 5 도시철도 직류급전시스템 등가화

Fig. 5 Equivalence model of DC power system

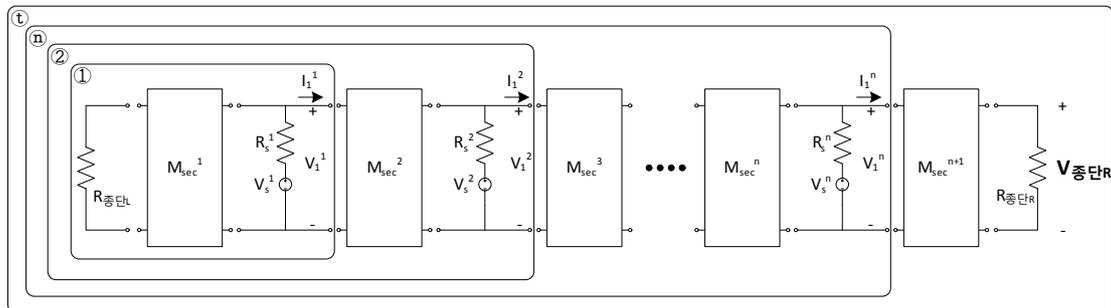


그림 6 등가회로 해석방법 일반화

Fig. 6 Generalization of equivalent circuit analysis method

여기서,  $M_{FR} = [1 R_{종단L}]$ ,  $M_{S1}^k = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ \frac{1}{R_s^k} & 1 \end{bmatrix}$ ,  $M_{S2}^k = \begin{bmatrix} 0 \\ \frac{1}{R_s^k} \end{bmatrix}$

$V_s^k, I_s^k$  : k번째 변전소 우측단 전압 및 전류

첫 번째 변전소 우측부터 두 번째 변전소 우측까지의 수식을 정리하면 식 (5)와 같다.

$$\begin{bmatrix} V_1^1 \\ I_1^1 \end{bmatrix} = M_{sec}^2 \left\{ M_{S1}^1 \begin{bmatrix} V_1^2 \\ I_1^2 \end{bmatrix} - M_{S2}^2 V_S^2 \right\} \quad (5)$$

선로좌측말단부터 좌측 두 번째 변전소 구간의 수식을 정리하기 위해 식 (4)에 식 (5)를 대입하여 정리하여, 선로좌측말단부터 n번째 변전소구간까지의 계산식을 일반화 하면 식 (6)과 같다.

$$0 = M_{FR} \left\{ \prod_{k=1}^n M_{sec}^k M_{S1}^k \begin{bmatrix} V_1^{n+1} \\ I_1^{n+1} \end{bmatrix} - \sum_{k=1}^n \left( \prod_{l=1}^k M_{sec}^l M_{S2}^l \right) V_S^k \right\} \quad (6)$$

선로 좌측 말단부터 선로의 마지막에 위치한 n번째 변전소까지 직렬로 곱한 식 (6)에 n번째 변전소의 우측항 식 (7)을 대입하면 식 (8)와 같이 정리된다.

$$\begin{bmatrix} V_1^{n+1} \\ I_1^{n+1} \end{bmatrix} = M_{sec}^{n+1} M_{TO} V_{종단R} \quad (7)$$

여기서,  $M_{TO} = \left[ 1 \frac{1}{R_{종단R}} \right]^T$

$V_{종단R}$  : 선로 우측 말단에 걸리는 전압

$$0 = M_{FR} \left\{ \prod_{k=1}^n M_{sec}^k M_{SI}^k M_{sec}^{n+1} M_{TO} V_{종단R} - \sum_{k=1}^n \left( \prod_{l=1}^k M_{sec}^l M_{SI}^l \right) V_s^k \right\} \quad (8)$$

위의 식 (8)에서  $M_{FR} = [1 R_{종단L}]$ 이며  $R_{종단L}$ 의 값을  $\infty$ 로 정의하였으므로  $M_{FR}$ 과 직교하는 행렬을 구할 수 없으므로

$$\prod_{k=1}^n M_{sec}^k M_{SI}^k M_{sec}^{n+1} M_{TO} V_{종단R} - \sum_{k=1}^n \left( \prod_{l=1}^k M_{sec}^l M_{SI}^l \right) V_s^k = 0$$

이 되어야 한다.

따라서 선로우측말단 전압은 식 (9)과 같이 구할 수 있다

$$V_{종단R} = \left( \prod_{k=1}^n M_{sec}^k M_{SI}^k M_{sec}^{n+1} M_{TO} \right)^{-1} \times \sum_{k=1}^n \left( \prod_{l=1}^k M_{sec}^l M_{SI}^l \right) V_s^k \quad (9)$$

위 식 (9)에서 구한  $V_{종단R}$ 로부터 좌측으로 각 회로요소를 곱함으로써 그림 5의 모든 회로요소에 대한 전압, 전류를 계산할 수 있다.

### 2.3 DC급전회로 해석 사례

도시철도 직류급전시스템의 모든 변전소는 전차선을 통해 병렬로 연결되어 있다. 전차선로에 위치한 차량은 차량으로부터 가까운 변전소뿐만 아니라 원거리의 변전소로부터도 어느 정도의 전력을 공급받고 있다. 따라서 차량으로부터 거리에 따라 변전소 부하공급의 변화를 위의 단자망 모델식을 이용하여 예측하고자 한다.

#### 2.3.1 검토 조건

- DC변전소 수 및 간격 : 11개 변전소, 4km간격
- 차량의 위치 : 100~144km구간을 1km단위로 이동
- 선로조건 : 복선선로
- 부하조건 : 20[MW]
- 검토항목 : 각 변전소 공급전압, 전류, 부하, 부하분담율

#### 2.3.2 시뮬레이션 결과

차량을 급전선로의 좌측 말단부터 급전선로의 우측 말단까지 1km단위로 이동하면서 급전선로에 위치한 각 DC변전소의 공급 전압, 공급전류, 공급부하 및 부하분담율을 계산하였다. 아래 그림 7에 그 결과의 일부를 나타내었다. 변전소의 위치가 차량으로부터 거리가 멀어질수록 변전소의 전압강하, 전류공급, 공급부하 및 부하분담율 모두가 작아진다. 또한 차량의 좌측과 우측의 변전소가 충분히 있을 때는 차량의 양쪽에서 공급받는 부하가 동일하다고 볼 수 있다.

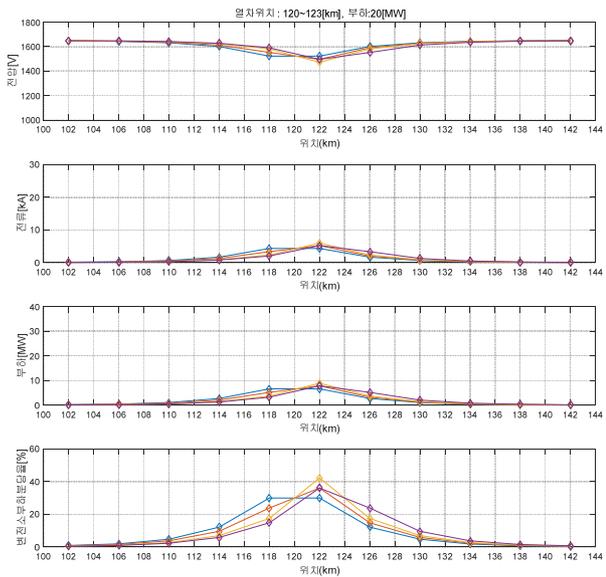
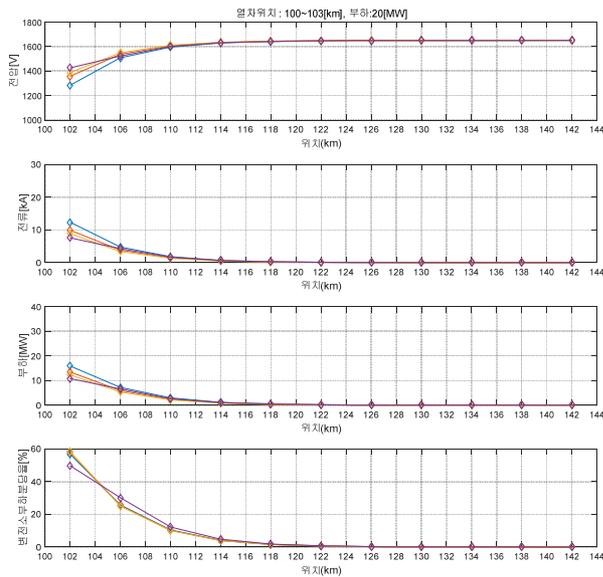


그림 7 차량위치에 따른 변전소 전압, 전류, 부하 및 부하분담율

Fig. 7 Supply voltage, current, electrical load and load ratio according to train position

위의 시뮬레이션 결과로부터 변전소의 부하분담율이 일정% 이상인 변전소의 수를 정리하면 아래 그림 8과 같다. 예를 들어 선로에 차량이 있을 때 차량이 급전구간의 말단에 위치하는 경우 부하분담율이 5% 이상인 변전소는 4개소이며, 차량이 급전구간의 말단을 벗어남에 따라 부하분담율이 5% 이상인 변전소는 6개소로 나타났다. 이는 급전선로상의 차량을 중심으로 좌/우측 각각 3개의 변전소에서 차량에 필요한 대부분의 부하를 공급하고 있다고 볼 수 있다.

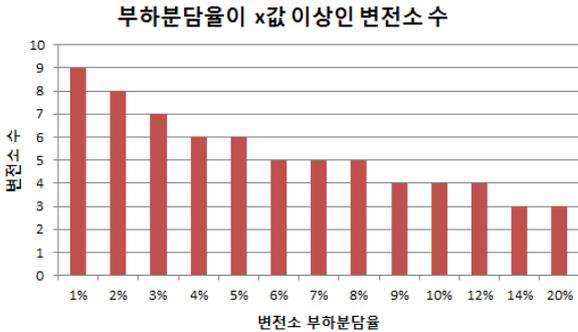


그림 8 부하분담율에 따른 변전소 수  
Fig. 8 Number of substation according to load ratio

### 3. 결 론

도시철도 직류급전시스템에서 급전시스템을 구성하는 변전소, 전차선로 및 차량을 4단자망 해석기법을 활용하여 입력측 전압/전류단자와 출력측 전압/전류단자로 표현되는 등가회로로 모델링 방안을 제안하였다. 제안된 4단자망 해석기법을 활용한 등가회로 모델링은 [2x2]행렬식으로 모델링됨으로 [2x2]행렬의 합과 곱의 형태로 해를 구할 수 있으며, n개의 직류변전소를 갖는 직류급전 시스템에 대하여 각 회로요소의 해를 구하는 일반화된 계산방법을 제시하였으며 사례연구를 통해 직류급전시스템 해석의 유용함을 보였다.

향후 제안된 등가회로 모델링 방안을 이용하여 각 직류변전소의 용량산정, 급전구간을 운행하는 각 차량의 전압과 변전소 공급전력을 계산하는 일반화된 직류급전시스템 해석프로그램을 개발하고, 실제 운영 중인 선로를 대상으로 비교검증을 수행함으로써 제안된 모델링 방안에 대한 정확성을 검증하고자 한다.

#### 감사의 글

본 연구는 한국철도기술연구원 주요사업의 연구비 지원으로 수행되었습니다.

### References

- [1] S. Jung, et. al, "Computer Algorithm for the Loadflow of the DC Traction Power Supply System", Spring Conference of the Korean Society for Railway, pp. 78~85, 2000.
- [2] U. Cho, et. al, "Modeling for the Analysis of Rail Potential in the DC Railway Power System", Trans. KIEE, Vol. 24, No. 6, pp. 138-146, 2010.
- [3] J. Choi, et. al, "Modeling DC Electric Railway System using the PSCAD/EMTDC", Autumn Conference of KIEE, 2002
- [4] S. Chang, K. Oh, J. Kim, and J. H. Kim, "Harmonic Analysis for Traction Power Supply System Using Four-Port Network Model", Trans. KIEE. Vol. 51, No. 6, pp. 255~316, 2002
- [5] K. Oh, H. Lee, S. Chang, J. H. Kim, "8-Port Network Model for Harmonic Analysis on the Test Track in Seoul-Pusan High-Speed Railway", Trans. KIEE. Vol. 51, No. 3, pp. 99~106, 2002
- [6] S. H. Chang, Multi-Port Modeling, Steady State Analysis and Power Quality Assessment in the Electric Railway Power System, Thesis for Doc., Hongik University, 2001.

### 저 자 소 개



#### 이 장 무 (Chang-Mu Lee)

1969년 10월 4일생. 1991년 한양대학교 공대 전자통신공학과 졸업, 1994년 동 대학원 전자통신공학과 졸업(공학석사), 2013년 고려대학교 전기공학과 졸업(공학박사), 1997~현재 한국철도기술연구원 책임연구원  
E-mail : cmlee@krri.re.kr



#### 장 동 욱 (Dong-Uk Jang)

1976년생. 1998년 충북대학교 공과대학 전기공학과 졸업. 2000년 동북대학원 전기공학과 졸업(석사). 2000.08.~현재 한국철도기술연구원 선임연구원  
E-mail : dujang@krri.re.kr



**김 재 원 (Jae-Won Kim)**

1979년 8월 28일생. 2006년 고려대학교 전기전자전공공학부 졸업. 2008년 고려대 대학원 전자전공학과 졸업(석사). 2015년 동대학원 전기전공학과 수료(박사). 2011~현재 한국철도기술연구원 무선급전연구팀 선임연구원

E-mail : youngkjw@krri.re.kr



**한 문 섭 (Mun-Seup Han)**

1964년 11월 26일생. 1987년 인하대학교 전기공학과 졸업, 1989년 동 대학원 전기공학과 졸업(석사), 1989~1994년 국방과학연구소 근무, 1995년~현재 한국철도기술연구원 책임연구원

E-mail : mshan@krri.re.kr



**정 환 수 (Hwan-Su Jung)**

1990년 2월 11일생. 2015년 한라대학교 전기전자공학과 졸업, 2015~현재 고려대학교 대학원 전기전자공학과 석사 과정

E-mail : hwansu123@krri.re.kr



**김 주 락 (Joo-Rak Kim)**

1974년 3월 22일생. 1997년 흥익대 전자전기공학부 졸업. 1999년 동대학원 전기제어공학과 졸업(공학석사). 2010년 동대학원 전기정보제어공학과 졸업(공학박사). 2000년~현재 한국철도기술연구원 선임연구원

E-mail : jrkim@krri.re.kr