

# 전기철도 단권변압기 중성점 탭절환 특성연구

## Parametric Study for Variable Tap of Autotransformer Neutral in AC Feeding

한 문 섭\* · 이 장 무\* · 김 재 원\* · 창 상 훈\*

(Moonseob Han · Chang-Mu Lee · Jae-Won Kim · Sang-Hoon Chang)

**Abstract** - The voltage drop is important in electric railway for feeding a huge power of train on fixed feeding area. Nowadays it is tried to operate a high speed trains on conventional lines and there is problem on the voltage drop too. It is simulated on the conditions increased the turn ratio of trolley, installed autotransformer neutral line with variable taps. In result, it is compensated the voltage drop between ATs and better on last AT, not on the position of AT. And it is decreased a return current and neutral current of AT because of unbalance between trolley and feeder. It should be studied faster and more controllable the solid state switchs instead of the mechanical one in order to utilize this system.

**Key Words** : AC railway feeding, Autotransformer, Variable tap

### 1. 서 론

전기철도 교류급전시스템은 직접, Booster 및 단권변압기(Autotransformer) 급전방식 중 국내에서는 단권변압기 급전방식을 표준으로 사용하고 있다. 단권변압기 급전방식은 전압강하 보상 및 대지유도전류 저감에 큰 장점을 갖는 방식이다. 하지만 제한된 급전구간을 대전력을 소비하면서 이동하는 고속차량의 속도 향상으로 인해 전압강하의 문제점을 야기 시키고 있다. 대체적으로 전압강하보상을 위해 외국에서는 적극적으로 무효전력보상기를 이용하고 있으나 국내에서는 변전소에서 두 대의 급전변압기를 병렬운전하여 변압기 내부임피던스를 줄이거나 인접변전소간 급전구분소를 연결하여 양쪽 변전소에서 급전을 받아 전압강하를 줄이는 소극적인 방식을 사용하고 있으나 이는 전력사업자와의 계약에 관계되어 지속적인 운영은 어려운 실정이다.[1]

세계적으로 전기철도 단권변압기의 중성점간의 비율은 1:1인 대칭구조의 변압기를 사용하고 있으나 예외적으로 미국에서는 급전선과 중성점간을 전차선과 중성점에 N배로 비대칭구조를 갖는 단권변압기를 사용하여 선로임피던스를 1:1 단권변압기에 비해  $\frac{1}{N}$ 로 줄여 에너지 절감과 전압강하에 효과적인을 사용하고 있다.[2]

국내에서는 2009년경에 에너지절감을 위해 기존의 전차선과 급전선간 전압 55kV를 유지시키면서 전차선과 중성선간의 전압을 증가시켜 27.5+ $\Delta V$  kV로 하고 급전선측을 27.5- $\Delta V$  kV 감소

시키는 방안을 제시하였으며 전압강하 보상과 함께 급전용량 증가 및 에너지 절약에 장점을 갖고 있음을 확인하였다[3]-[6].

한편 한국전력공사에서는 최근 탈 원전 등의 국가정책에 따라 신재생 발전이 급격히 증가하고 있으며 신재생발전은 보통 태양광과 풍력 등이 주로 사용되는데 지속적인 발전이 되지 않는 단점으로 인한 전압변동의 문제점을 갖다. 이를 해결하기 위해 OLTC(On-Load Tap Changer)에 의한 변압기 탭절환 전압조정기의 설치가 늘어나고 있는 실정이다. OLTC에 의한 탭절환 속도는 5초 이상으로 느리고 반복적인 탭절환에 의해 기계적 접점의 마모가 빠르게 진행되는 문제점을 갖고 있어 보다 빠른 탭절환 속도와 탭 접점마모의 유지보수 문제점을 극복하기 위해 OLTC 대신 사이리스터 스위치 소자를 이용한 탭절환장치의 개발에 대한 필요성이 요구되어 진다.

따라서 배전계통의 사이리스터 탭절환 변압기의 기술개발에 발맞추어 전기철도에서도 탭절환 단권변압기에 대한 실용화도 가능할 것으로 판단되며 배전계통의 사례연구를 통하여 탭절환 단권변압기의 개발과 상용화가 가능하겠다.[7]

본 논문에서는 최근 전기철도에서 제한된 급전선로를 보다 많은 고속의 전기차량이 운행함에 따라 발생하는 전압강하 문제를 해결하기 위한 방안으로 기존의 1:1 단권변압기를 1:N으로 변경함에 따른 전압강하 보상을 제안하였다. 그리고 제안된 모델의 특성분석을 위해 전차선과 레일의 직접 단락시 고장전류에 대한 해석 및 분석을 수행하였다. 해석을 위하여 6 단차량의 교류급전 모델을 기본으로 중성점 탭절환 단권변압기를 모델링하고 30km 급전선로에서 10km마다 단권변압기가 설치되었을 때 변전소에 설치된 단권변압기와 첫 번째 급전보조구분소에 설치된 단권변압기의 권수비를 각각 전차선과 레일간이 1:1에서 1:1.5로 증가시켰을 때 탭절환에 의한 파라미터 해석을 위해 고장 임피던스 및 단락전류와 단권변압기 유입전류에 대해 시뮬레이션을 수행하였다.

\* Corresponding Author : Metropolitan Transportation Research Center, Korea Railroad Research Institute, Korea  
E-mail:shchang@krii.re.kr,

\* Metropolitan Transportation Research Center, Korea Railroad Research Institute, Korea.

Received : October 13, 2017; Accepted : December 1, 2017

## 2. 본 론

### 2.1 6단자망 해석모델

그림 1은 단권변압기방식의 교류급전계통을 보이고 있으며 6 단자망을 이용하여 변압기와 선로 등의 각 단위모델별 모델 M을 이용하여 변전소와 말단구분소의 6단자 행렬을 유도하면 식 (1)과 같다.

$$\begin{bmatrix} V_s \\ V_s \end{bmatrix} = M_{ZS} \cdot M_{LINE} \cdot M_{AT} \cdots \cdots M_{LINE} \cdot M_{TRAIN} \cdot M_{LINE} \cdot M_{SP} \cdot \begin{bmatrix} V \\ I \end{bmatrix} \quad (1)$$

식 (1)에서 행렬  $M_{ZS}$ ,  $M_{AT}$ ,  $M_{LINE}$ ,  $M_{SP}$ ,  $M_{TRAIN}$ 은 각각 변압기를 포함한 전원, 단권변압기, 전차선로, 말단 급전구분소와 차량이며 식(1)에서 급전구분소측의 단권변압기에 흐르는 전압  $V$ 와 전류  $I$ 를 구하기 위해서는 통합행렬  $M$ 에 의해 식 (2)에 의해 구할 수 있다.

$$\begin{bmatrix} V \\ I \end{bmatrix} = M^{-1} \cdot \begin{bmatrix} V_s \\ V_s \end{bmatrix} \quad (2)$$

여기서,  $M$  : 통합행렬 (4 X 4)

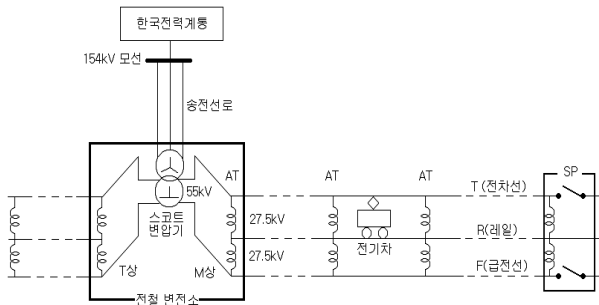


그림 1 단권변압기방식 교류급전계통  
Fig. 1 Autotransformer feeding

또한 각 M 모듈간의 전압과 전류를 구하기 위해서는 식 (2)에서 구한 전압과 전류를 이용하여 순차적으로 6단자 행렬  $M$ 을 곱하면 급전시스템의 각 모듈에 흐르는 전압과 전류를 산출할 수 있다.

### 2.2 단권변압기 중성점 탭절환 모델링

#### 2.2.1 단권변압기의 원리

단권변압기는 보통의 변압기처럼 1차권선과 2차권선으로 구성 되어 있지 않고, 그림 2와 같이 공통철심을 이용하여 코일을 감고 이것을 직렬 접속하여 1차와 2차의 단자를 인출해 낸 변압기이다. 단권변압기 1차측 및 2차측의 전압 전류 관계는 식 (3)과 같다.

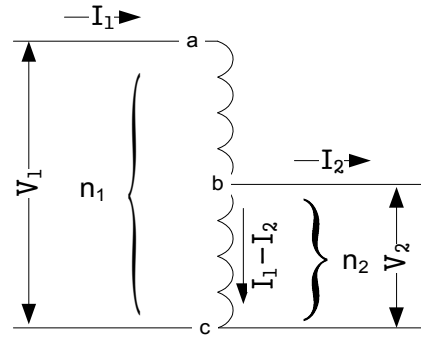
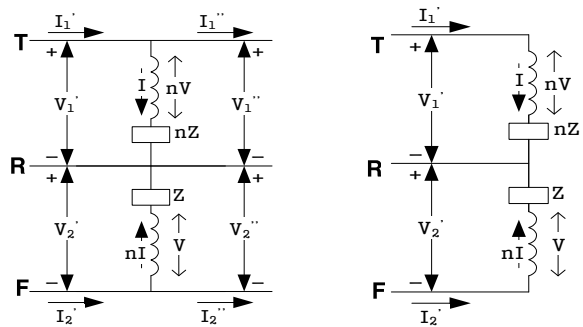


그림 2 단권변압기 기본회로  
Fig. 2 Autotransformer basic circuit



(a) 변전소/급전보조구분소 (b) 급전구분소  
(a) Substation/Sub-Sectioning Post (b) Sectioning Post

그림 3 가변탭 단권변압기 6단자모델

Fig. 3 6 terminal model of Variable Tap Autotransformer

$$\frac{V_1}{V_2} = \frac{n_1}{n_2}, \quad \frac{I_1}{I_2} = \frac{n_2}{n_1} \quad (3)$$

여기서,  $n_1$  : 1차권선수  
 $n_2$  : 2차권선수

#### 2.2.2 가변탭 단권변압기의 모델

전기철도 교류급전계통에서 사용하는 단권변압기 급전방식은 3상 154kV를 수전받아 전철용 스코트 주변압기를 통해 90도의 위상차를 갖는 두 M과 T상의 55kV로 변환하여 단권변압기를 거쳐 급전선(F), 전차선(T) 및 보호선(R)에 접속하여 전기차량에 필요한 전력을 공급하는 방식이다.

가변탭 단권변압기는 그림 3의 회로에서 2차권선수( $n_2$ )가 1차 권선수( $n_1$ )의 50%에서 변경되는 것으로 개념을 잡았다. 즉 2차 권선수 R-F간을 기준으로 하여 T-R간의 비를 부하상태에서 변화시켜 T-F간의 전체전압이 동일한 상태에서 T-R간의 전압을 증가시키고, R-F간의 전압을 감소시켜 차량이 필요로 하는 T-R 간 전압을 상승시켜 차량의 전압강하를 저감시키고자 하였다. 따라서 T-R간 및 R-F간의 권수가 같지 않아 권선의 임피던스도

마찬가지로 같이 않아 가변형 단권변압기를 모델링함에 있어, 권수의 변화와 이에 따른 임피던스의 변화를 권선별로 반영하였다. 6단자망 해석이론을 이용하기 위한 가변형 단권변압기의 행렬식은 변전소나 급전보조구분소는 식 (4)와 급전구분소의 단권변압기는 식 (5)와 같게 된다.

$$M_{at} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 1 & -1 & 1 \\ \frac{2(1+n)Z_{at}}{2(1+n)Z_{at}} & \frac{2(1+n)Z_{at}}{2(1+n)Z_{at}} & 1 \\ 1 & -1 & 1 \\ \frac{2(1+n)Z_{at}}{2(1+n)Z_{at}} & \frac{2(1+n)Z_{at}}{2(1+n)Z_{at}} & 0 \end{bmatrix} \quad (4)$$

$$M_{sp} = \begin{bmatrix} 1 & 2nZ_{at} \\ 1 & -2nZ_{at} \\ 0 & 1 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (5)$$

여기서, n ; 권수비

Zat ; 단권변압기 임피던스 (Ω)

### 2.3 탭절환 단권변압기를 이용한 고장해석

#### 2.3.1 고장해석 조건

고장해석을 위하여 표 1과 2와 같이 경부고속철도 신창주변전소의 변전계통과 전차선로 데이터를 활용하여 30km의 단선선로에 10km마다 단권변압기가 설치되고 전차선과 레일간의 직접단락조건에서 시뮬레이션을 수행하였다.

표 1 해석조건

Table 1 Simulation conditions

구분	조건
송전계통 임피던스	0.141+j1.505 [100MVA기준]
송전선로 임피던스	0.111+j4.2 [100MVA 기준]
전철용 주변압기	45,000[kVA], %Z=10, X/R=23
단권변압기	10MVA, 0.35Ω
급전구성	30[km] 단선선로, 단권변압기간 거리 10[km]
단락조건	전차선과 레일간 직접 단락

표 2 회로정수

Table 2 Catenary impedances

회로정수 (Ω/km)	전차선	레일	급전선
전차선	0.088 + j0.245	0.008 + j0.054	0.008 + j0.054
레일	0.008 + j0.054	0.030 + j0.081	0.008 + j0.054
급전선	0.008 + j0.054	0.008 + j0.054	0.106 + j0.350

### 2.3.2 고장해석

전기철도시스템은 수송량, 에너지효율, 운영비용과 친환경성 측면에서 다른 교통수단과 비교하여 많은 장점을 가지고 있다. 그럼에도 승객과 전기 신호기기의 안전에 영향을 끼치는 장애가 발생할 수 있다. 전기철도시스템에서 고장이 발생하게 되면, 고장을 신속하게 제거하고 안전측면에서 정상적인 동작과 구별되어야 한다. 그러므로 급전시스템을 설계할 때 고장발생에 대한 주의 깊은 연구가 필요하다.

표 3과 같이 단권변압기를 기준 1:1에서 각 위치의 단권변압기의 권선비를 1:1.5로 변화하였을 때를 CASE I에서 IV로 구분하여 전차선과 레일간 단락 시뮬레이션을 수행하였다.

표 3 단권변압기 권선 비 사례

Table 3 Case study conditions on AT turn ratio

	AT <sup>1st</sup>	AT <sup>2nd</sup>	AT <sup>3rd</sup>	AT <sup>4th</sup>
기준AT	1.0	1.0	1.0	1.0
Case I	1.5	1.0	1.0	1.0
Case II	1.0	1.5	1.0	1.0
Case III	1.0	1.0	1.5	1.0
Case IV	1.0	1.0	1.0	1.5

그림 4는 각 유형별 고장위치에 따른 변압기 유입고장전류를 비교하여 나타냈으며 결과는 다음과 같다.

- AT 위치에서의 고장전류는 동일하며 AT간에서는 1:1인 기준 AT일 때 고장전류가 가장작고 1:1.5인 AT 측의 고장전류가 증가한다.
- Case 1과 Case 2, 즉 1:1.5인 AT가 첫 번째와 두 번째 있을 경우를 비교하면 고장전류가 Case 1이 크다가 6km 이후의 고장전류가 Case2가 커지는 것을 알 수 있다.

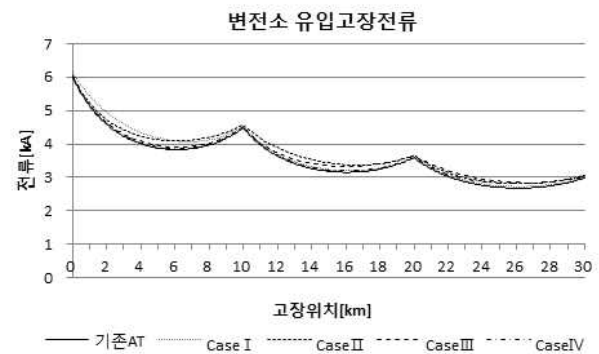


그림 4 탭 절환 AT 위치에 따른 변전소 유입고장전류

Fig. 4 S/S fault current on variable tap AT locations

그림 5는 각 유형별 고장위치에 따른 단락임피던스를 비교하여 나타냈으며 결과는 다음과 같다.

- 고장전류와 동일한 패턴으로 AT위치에서의 임피던스는 동일하

며 AT간에서는 1:1인 기존 AT일 때 고장전류가 가장 크고 1:1.5인 AT 측의 임피던스가 감소한다.

- Case 1과 Case 2, 즉 1:1.5인 AT가 첫 번째와 두 번째 있을 경우를 비교하면 임피던스가 Case 1이 작다가 6km 이후의 임피던스가 Case 2가 작아지는 것을 알 수 있다.

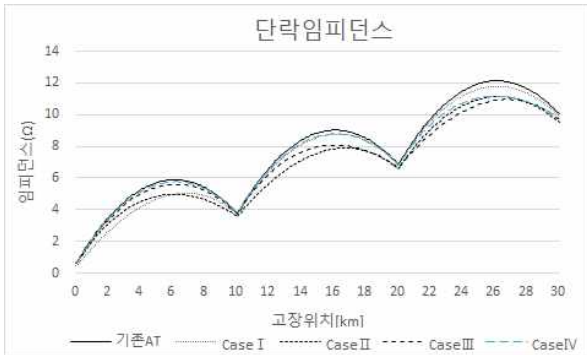


그림 5 탭 절환 AT 위치에 따른 단락임피던스  
Fig. 5 Fault impedance on variable tap AT locations

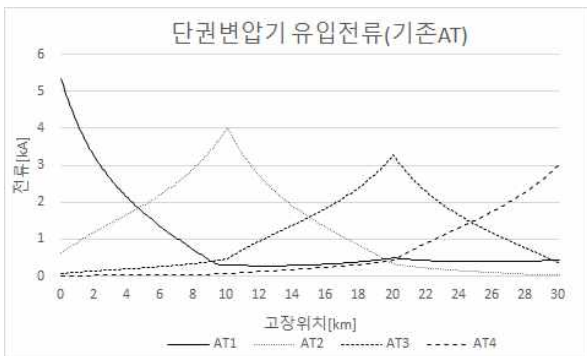


그림 6 단권변압기로 유입되는 고장전류(기본 AT)  
Fig. 6 Fault current on ATs (1:1 AT)

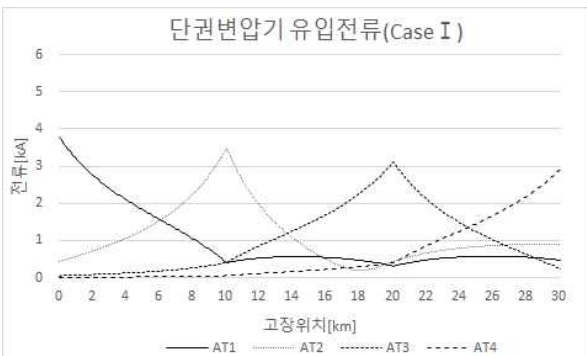


그림 7 단권변압기로 유입되는 고장전류(Case I)  
Fig. 7 Fault current on ATs (Case 1)

그림 6부터 8까지는 1:1 AT와 첫 번째와 마지막 AT가 1:1.5로 설치될 경우의 3가지 조건에서 각 단권변압기로 유입되는 전류를 보이고 있다.

- 단권변압기 유입전류는 차량부하가 단권변압기에 있을 때 가장 크며
- 첫 번째 AT가 1:1.5로 설치되면 첫 번째 단권변압기 유입전류가 크게 감소하며 다음 단권변압기도 거리에 따라 감소하는 것을 알 수 있고 마지막 AT의 유입전류에 영향을 거의 없다.
- 반대로 마지막 AT가 1:1.5로 설치되면 마지막 AT의 유입전류는 감소하지만 첫 번째와 두 번째 AT의 유입전류는 영향을 미치지 않는다.

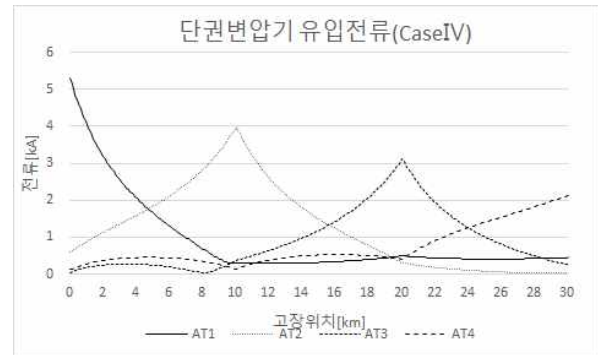


그림 8 단권변압기로 유입되는 고장전류(Case IV)  
Fig. 8 Fault current on ATs (Case IV)

본 논문에서는 4대의 단권변압기를 갖는 30km 급전선로에서 각 위치에서의 단권변압기 권수비를 1:1.5로 전차선과 레일 간을 증가시켰을 경우, 고장전류 및 단락 임피던스의 변화와 각 단권변압기에 유입되는 전류를 6 단자망을 이용하여 시뮬레이션을 수행하였다.

전차선과 레일의 단권변압기 권수비를 증가시키기에 따라 고장전류 증가/단락 임피던스 감소로 전압강하의 효과가 있음을 확인하였으며, 단권변압기로 유입되는 전류는 단권변압기의 권수비를 1:1.5로 변경시킬 경우 권수비 만큼 약 70% 단권변압기로의 유입전류가 감소하므로 단권변압기의 유입전류에 대한 보다 심층적인 분석이 필요하다.

### 3. 결 론

본 논문에서는 최근 전기철도에서 고속철도의 일반선 운행에 따른 전압강하 문제를 해결하기 위한 방안으로 단권변압기의 중성선 탭을 전차선을 증가시켜 전압강하를 보상하는 방안에 대한 시뮬레이션을 수행하였다. 시뮬레이션은 1:1인 기존의 경우와 각 AT를 1:1.5로 변경 설치하였을 때 변화를 살펴보기 위해 변전소 유입고장전류, 단락임피던스와 각 단권변압기 유입전류의 변화를 살펴보았다.

결과적으로

- 차량부하가 단권변압기 위치에 있을 경우 변전소 유입고장전류와 단락임피던스는 AT의 권선비가 변화하여도 동일하며 전압강하 효과는 없다.
- 하지만 단권변압기 간에 차량이 있을 경우 전압강하 보상효과는 있으며 전압강하문제가 발생하는 측에 단권변압기 권선비를 증가시키면 전압강하를 보상할 수 있다.
- 전압강하 보상효과는 가급적 말단의 단권변압기 권선비를 증가시키는 것이 효과가 증대된다.
- 권선비의 변화로 단권변압기의 유입전류는 증가하지 않으므로 통신유도문제는 발생하지 않을 것으로 예상된다.

현재 탭변환장치는 OLTC(On-Load Tap Changer) 사용되고 있어 전압강하보상에 신속한 대처가 힘들어 본 논문에서 제시한 탭절환 AT는 실용화에 어려움이 있으나 최근 신재생발전 증가 및 개도국의 배전전압안정화를 위한 전자식 탭 변환이 소개되고 있어 이와 융합된 연구가 필요하다.

### 감사의 글

본 연구는 한국철도기술연구원 주요사업의 연구비 지원으로 수행되었습니다.

### References

- [1] Yoshifumi Mochinaga, "Technical Lecture in Railway Feeding System", RTRI, 1995.
- [2] Rafat Kadhim, "Feasibility of asymmetric autotransformer electrification system", RSSB, 2010.
- [3] Lee, Chang-Mu, Han, Moon-Seub and Lee, Han-Min, "Evaluation of the variable TAB Autotransformer for ascending collecting Voltage", Spring Conference of The Korean Society for Railway, 2009.5.
- [4] Lee, Chang-Mu, Han, Moon-Seub, Lee, Han-Min Ju-Rak Kim and Gil-Dong Kim, "Examination of Increasing Power Delivery Capacity with variable Tab Autotransformer", KIEE Summer Conference, 2009.7.
- [5] Joorak Kim, MoonSeob Han, Sang-Hoon Chang and Jung-Hoon Kim, "Fault Analysis of AC Traction Power Supply System using Autotransformer with Variable Tap Changer", ICEFA IV, 2010.7.
- [6] Joorak Kim, MoonSeob Han and Sang-Hoon Chang, "Fault Impedance Calculation as Autotransformer Tab Change in Traction Power Supply System, MEMPS, 2010.9.
- [7] Jawad Fai and, Behzad Siahkolah, "Electronic Tap-changer for Distribution Transformers", Springer, 2011.

## 저 자 소 개



### 한 문 섭 (Moonseob Han)

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



### 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



### 김 재 원 (Jae-Won Kim)

1979년 8월 28일생. 2006년 고려대학교 전기전자공학과 졸업. 2008년 고려대 대학원 전기전자공학과 졸업(석사), 2015년 동 대학원 전기전자공학과 수료(박사). 2011~현재 한국철도기술연구원 무선급전연구팀 선임연구원



### 창 상 훈 (Sang-Hoon Chang)

2002년 홍익대 대학원 전기정보제어공학과 졸업(공학박사). 1992년~1994년 철도청 기술연구소. 1994년~현재 한국철도기술연구원 수석연구원