

2차 보간법을 이용한 전기철도 급전계통의 고장점 산출 기법에 관한 연구

A Study on Estimation Technique for Fault Location using Quadratic Interpolation in a Parallel Feeding AC Traction System

민 명 환* · 안 태 풍* · 권 성 일** · 정 호 성*

(Myung-Hwan Min · Tae-Pung An · Sung-il Kwon · Hosung Jung)

Abstract - Nowadays reactance method is being used as a technique for fault location in parallel feeding AC traction power system. However, implementation of this method requires a large number of field tests(ground fault) which is a huge burden on the operators. This paper presents a new estimation technique using quadratic interpolation to reduce number of times for field test and improves the accuracy of fault location. To verify a new technique, we solve AT feeding circuit and model it using PSCAD/EMTDC. Finally this paper conducts a comparative analysis of usefulness between a new technique and real field data.

Key Words : Fault location estimate technique, Quadratic interpolation, Parallel feeding system, reactance method

1. 서 론

전기철도 급전계통에서 단락 혹은 지락 사고시 변전소의 급전 보호반에서는 전력공급을 신속히 차단하고, 동시에 고장점표정반에서는 고장 위치를 연산하여 고장지점을 현시한다. 여기서 고장 지점의 정확도에 따라 고장복구 시간이 정해지며, 보다 정확한 고장지점의 연산은 전력차단(단전)시간을 감소시킬 수 있다. 현재 국내 전기철도 급전계통의 고장점을 표정하기 위해 흡상전류비 방식과 리액턴스방식을 사용하고 있다. 일반적으로 흡상전류비 방식은 병렬급전계통(일반선)에서 사용하고 있으며, 리액턴스 방식은 병렬급전계통(고속선)에서 사용하고 있다. 흡상전류비 방식은 고장지점 좌우 양단의 AT(auto transformer) 중성점 흡상전류를 계측하여 고장점을 연산하는 방식으로 원거리(수 km~수십 km)에 있는 전류정보를 변전소에서 취합하여 연산을 한다. 이 방식은 계통의 AT마다 계측장비 및 통신장비 구성으로 인해 설치 비용이 크며, 원거리 통신장비의 통신지연에 따른 거리표정 오차가 발생한다. 이에 비해 리액턴스방식은 변전소의 전압/전류 계측만으로 고장지점을 연산하여 장비구성이 간단하고 통신지연문제도 발생하지 않는 장점이 있다. 하지만 AT의 병렬구성으로 인해 선로 임피던스가 거리에 비례하지 않고 비선형성을 가지며, 급전계통해석을 통한 전차선로 임피던스를 계산하는 식도 존재하지 않아 선로

리액턴스 값을 산출하는 것이 매우 어렵다. 따라서 거리(사고지점)에 따른 선로 리액턴스 값을 정하기 위해 AT-AT 구간마다 3~5 지점에서 지락사고 시험을 하여 단락선로리액턴스를 측정하고 그 이산 값들을 보간법으로 보간하여 운영하고 있다[1].

본 논문에서는 교류전기철도 급전계통의 회로 해석을 통해 전차선로 리액턴스의 계산식을 제시하였다. 또한 전력계통해석 프로그램(PSCAD/EMTDC)을 이용하여 계산식의 유용성을 검증하였다. 검증된 리액턴스 계산식이 거리(사고지점)를 독립변수로 하는 2차 함수로 나타나는 것을 근거로, 2차 보간법과 기존 3~5개의 단락선로임피던스를 적용하여 고장지점에 따른 리액턴스 곡선을 추정하고 실제 고장점 데이터와 비교 분석 연구를 수행하였다.

2. 본 론

2.1 리액턴스 방식의 고장점 표정 기술

국내 교류전기철도 병렬급전계통(고속선)에서는 리액턴스 방식을 적용하여 고장점 표정반을 운영하고 있다. 리액턴스방식은 IEEE std C37.114-2014에 제시되어 있으며, 고장지점(m)은 주변 압기의 2차측(55kV)에서 측정된 전압(V)과 전류(I)를 나눈 값의 허수부(imaginary)와 단위 길이당 선로임피던스(Z_L)의 허수부를 나눈 값으로 연산한다[2].

$$m = \frac{Im(V/I)}{Im(Z_L)} \quad (1)$$

리액턴스방식을 운영하기 위해서 기본적으로 전차선로 임피던

† Corresponding Author : Dept. of R&D Strategy Division,
Korea Railroad Research, Korea
E-mail:hsjung@krri.re.kr

* Dept. of Power Electronic System Lab, Entec electric &
electronic., Ltd, Korea

** KOREA RAILROAD, Korea

Received : January 5, 2017; Accepted : February 27, 2017

스(Z_t)를 알아야 하며, 기존 운영 구간에서는 Carson-Pollazek 계산식을 이용하거나 인공지락시험을 수행하여 전차선로 임피던스를 취득하고 있다. 하지만 기하학적인 구조를 기반으로 계산하는 Carson-Pollazek 계산식은 토공구간, 교량구간, 터널구간의 조건에 따라 그 값이 달라지고 접지계통도 구간 마다 상이한 특징을 가지고 있다[3]. 또한 AT와 AT 사이(10km 내외)에 토공, 교량, 터널이 모두 존재할 경우 Carson-Pollazek 계산식을 적용하여 전차선로 임피던스를 한 구간의 값으로 일반화하는 것은 무리가 있다. 이를 개선하기 위해 구간마다 전차선로의 임의적인 지락시험을 수행하여 실제 전차선로의 임피던스를 측정하는 방법도 있지만 임피던스 곡선을 가시적으로 도출할 수 있을 정도로 여러 지점에서 지락시험을 하는 것은 무리가 있다. 철도설계 지침 및 편람에서는 리액턴스 방식의 고장점 표정기술을 적용할 경우 한 구간(AT와 AT 사이)에 5개 지점의 단락시험을 요구하고 있다 [3].

2.2 교류전기철도 급전계통 해석을 통한 전차선로 임피던스 계산

전차선로 임피던스를 계산하기 위해 그림 1과 같이 간략한 단선(single track)계통을 전압방정식으로 유도하여 해석하였다.

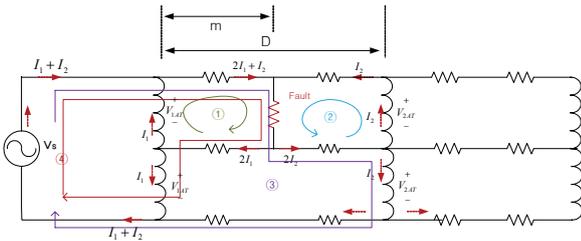


그림 1 교류전기철도 급전계통 단선(Single track) 회로도
Fig. 1 Circuit diagram of a single feeding AC traction system

키르히호프 전압방정식에 의해 다음과 같이 루프 방정식을 도출할 수 있다.

Loop ① $V_{1AT} = mZ_t(2I_1 + I_2) + V_{fault} + mZ_r(2I_1)$ (2)

Loop ② $V_{2AT} = (D-m)Z_tI_2 + V_{fault} + (D-m)Z_r(2I_2)$ (3)

Loop ③ $V_s = mZ_t(2I_1 + I_2) + V_{fault} + mZ_r(2I_2) + V_{1AT}$ (4)

Loop ④ $V_s = mZ_t(2I_1 + I_2) + V_{fault} + (D-m)Z_r(2I_2) + V_{2AT} + DZ_fI_2$ (5)

여기서, Z_t : 전차선(trolley, catenary) 임피던스
 Z_r : 레일(rail) 임피던스
 Z_f : 급전선(feeder) 임피던스
 $2I_1$: 고장시점으로부터 변전소 AT 중성점 방향으로

흐르는 전류
 $2I_2$: 고장시점으로부터 SSP AT 중성점 방향으로 흐르는 전류
 V_s : AT 1차 측(55kV)단에서 바라본 전압
 V_{fault} : 사고지점의 전압

Loop ① - Loop ②

$$V_{1AT} - V_{2AT} = mZ_t(2I_1 + 2I_2) + mZ_r(2I_1 + 2I_2) - DZ_tI_2 - DZ_r(2I_2)$$
 (6)

Loop ④ - Loop ③

$$V_{1AT} - V_{2AT} = -mZ_r(2I_1 + 2I_2) + DZ_r(2I_2) + DZ_fI_2$$
 (7)

식 (6) = 식 (7)

$$mZ_t\{2(I_1 + I_2)\} + mZ_r\{4(I_1 + I_2)\} = DZ_tI_2 + DZ_r(4I_2) + DZ_fI_2$$

$$\therefore \frac{m}{D} = \frac{Z_tI_2 + 4Z_rI_2 + Z_fI_2}{2Z_t(I_1 + I_2) + 4Z_r(I_1 + I_2)}$$

$$= \frac{Z_t + 4Z_r + Z_f}{2Z_t + 4Z_r} \cdot \frac{I_2}{I_1 + I_2}$$
 (8)

또한 $V_s = 2V_{1AT}$ 이므로

$$V_s = 2V_{1AT} = 2 \times \{mZ_t(2I_1 + I_2) + Z_{car}(2I_1 + 2I_2) + mZ_r(2I_1)\}$$

여기서,

$$I_{fault} = 2I_1 + 2I_2, \quad 2I_1 + I_2 = I_{fault} - I_2, \quad 2I_1 = I_{fault} - 2I_2$$

식 (8)에 대입하면 식 (9)와 식 (10)과 같다.

$$I_2 = \frac{m}{D} \cdot \frac{Z_t + 2Z_r}{Z_t + 4Z_r + Z_f} \cdot I_{fault}$$

$$V_s = 2\{(mZ_t + Z_{fault} + mZ_r) \cdot I_{fault} - (mZ_t + 2mZ_r) \cdot I_2\}$$

$$\therefore V_s = 2(mZ_t + Z_{fault} + mZ_r) \cdot I_{fault} - \frac{2(Z_t + 2Z_r)^2}{Z_t + 4Z_r + Z_f} \cdot \frac{m^2}{D} \cdot I_{fault}$$
 (9)

$$\therefore Z_{55kV} = \frac{V_s}{I_1 + I_2} = \frac{2V_s}{I_{fault}}$$

$$= 4m(Z_t + Z_r) - \frac{4(Z_t + 2Z_r)^2}{Z_t + 4Z_r + Z_f} \cdot \frac{m^2}{D}$$
 (10)

사고시 급전반 측에서 측정하는 임피던스는 식 (10)과 같이 사고 거리(m)에 대한 2차 함수임을 유추할 수 있다. 여기서 고장 저항에 따른 영향을 감소시키기 위해 식 (11)과 같이 리액턴스 부분만 추출하여 연산한다.

$$X_{55kV} = |Z_{55kV}| \times \sin\left(\angle \frac{V_s}{I_{fault}}\right) \quad (11)$$

실제 복선 계통(double track)의 임피던스 계산식도 이전 연구를 통해 도출되었으며 간략화 회로의 임피던스 계산식은 식 (12)이며 2차 함수임을 확인할 수 있다[4].

$$X_{55kV} = -\frac{m^2}{D} \{Z_t(1+3k)+4Z_r\} + m\{2Z_t(1+k)+4Z_r\} + (3-3k)DZ_t \quad (12)$$

2.3 모델링 및 시뮬레이션을 통한 임피던스 계산식 비교 검증

상기 연구내용에서 도출한 리액턴스 계산 값을 검증하기 위해 전력계통해석 프로그램(PSCAD/EMTDC)를 이용하여 급전계통을 모델링하였다. 급전계통은 스코트변압기(scott transformer), 단권 변압기(AT, auto transformer)와 전차선로(catenary system)로 구성하였으며 간략화를 위해 변전소(SS)와 보조급전구분소(SSP)로만 구성하여 모델링을 수행하였으며 파라미터 값을 표 1에 나타내었다[5].

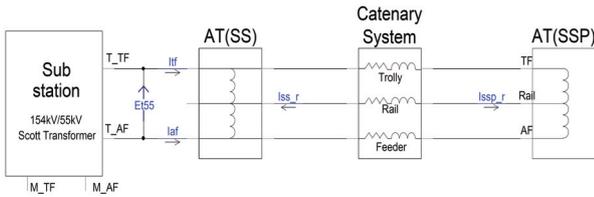


그림 2 PSCAD/EMTDC를 이용한 급전계통 간략화 모델링
Fig. 2 Simplified modeling for feeding system using PSCAD/EMTDC

표 1 모델계통 파라미터

Table 1 Parameters of modeling system

구성요소(파라미터)	값
AT 용량 및 리액턴스	10 [MVA], j0.4 [Ω]
전차선(TF) 임피던스	0.1076 + j0.2614 [Ω/km]
레일 임피던스	0.1052 + j0.4736 [Ω/km]
급전선(AF) 임피던스	0.1180 + j0.4519 [Ω/km]
변전소와 SSP의 간격	10 [km]
단락(지락) 저항	단락(지락)저항 : 0.01 [Ω]

전차선로 임피던스를 측정하기 위해 변전소로부터 보조급전구분소까지 100 미터 단위로 전차선-레일 간 단락사고를 모의하였으며, 전압/전류로 도출된 전차선로 리액턴스 계측 값과 식 (10), (11)에 의한 리액턴스 계산 값을 그림 3과 표 2에 나타내었다.

그림 3 및 표 2에서 볼 수 있듯이 시뮬레이션 결과 리액턴스 계측 값($X_{measure}$)과 계산 값($X_{calculate}$)이 최대 오차가 2.2%로 거의 일치함을 확인하였고, 2.2절의 계통해석과 임피던스 계산식의 유용성을 검증하였다.

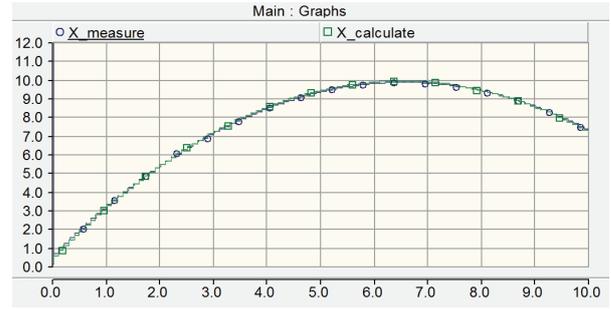


그림 3 시뮬레이션을 통한 계측 리액턴스와 계산식에 의한 리액턴스

Fig. 3 Measured reactance in simulation and calculated reactance

표 2 시뮬레이션을 통한 계측 리액턴스와 계산식에 의한 리액턴스 값 비교

Table 2 Comparison between measured reactance in simulation and calculated reactance

거리 [km]	$X_{measure}$ [Ω] ①	$X_{calculate}$ [Ω] ②	오차 [Ω] (①-②)	오차율 {(①-②)/①×100}
0	0	0		
1	3.045	2.978	0.067	2.2%
2	5.261	5.252	0.009	0.2%
3	7.043	7.076	0.033	0.5%
4	8.390	8.451	0.061	0.7%
5	9.302	9.376	0.074	0.8%
6	9.780	9.853	0.073	0.7%
7	9.821	9.880	0.059	0.6%
8	9.428	9.458	0.03	0.3%
9	8.601	8.588	0.013	0.2%
10	7.354	7.284	0.07	1.0%

2.4 2차 보간법(Quadratic interpolation)을 이용한 리액턴스 곡선 추정

상기 연구를 통해 사고 지점(m)에 따른 리액턴스 값이 2차 함수의 특성을 지니는 것을 확인할 수 있으며 식 (10)을 식 (13)과 같이 미지수(a, b, c)가 세 개인 2차 함수로 일반화할 수 있다. 따라서 세 지점의 위치와 리액턴스를 안다면 2차 보간법을 이용하여 미지수(a, b, c)를 구할 수 있고 또한 모든 지점의 리액턴스 값을 유추할 수 있다.

$$X = am^2 + bm + c \quad (13)$$

지락 시험을 통해 얻은 3개의 기지수 데이터 (m_1, X_1), (m_2, X_2), (m_3, X_3)의 점들을 2차 보간법을 이용하여 다음 식 (14)와 같이 함수를 추정할 수 있다[6].

$$F(m) = b_0 + b_1(m - m_1) + b_2(m - m_1)(m - m_2) \quad (14)$$

여기서,

$$b_0 = X_1, \quad b_1 = \frac{X_2 - X_1}{m_2 - m_1}, \quad b_2 = \frac{\frac{X_3 - X_2}{m_3 - m_2} - \frac{X_2 - X_1}{m_2 - m_1}}{m_3 - m_1}$$

식 (14)의 2차 보간 함수를 실제 리액턴스 값과 비교하기 위해 국내 A 변전소와 병렬급전구분소1(PP1), 병렬급전구분소2(PP2), 급전구분소(SP) 사이에서 지락시험을 통한 전차선로 리액턴스 값을 표 3에 제시하였고, 측정데이터는 '경부고속철도 단락임피던스시험'의 방법으로 취득한 값이다[7]. 또한 함수식과 실

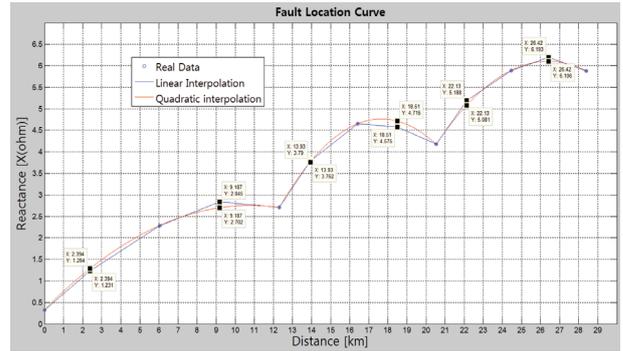


그림 4 실제 리액턴스 값과 2차 보간법을 활용한 곡선
Fig. 4 Curves for real data and quadratic interpolation data

표 3 지락시험을 통한 실제 측정 데이터

Table 3 Real measured data though ground fault test

상대거리 [km]	전원전압 [V]	하행선 전류 [A]			임피던스(하행선) [Ω]		
		TF	AF	(TF+AF)	R	X	Z
0.00	44.84	44.40	16.54	60.94	0.1744	0.3239	0.3679
19.44	147.45	38.80	16.33	55.13	0.5215	1.2314	1.3373
49.09	150.04	19.80	10.68	30.48	0.9107	2.2866	2.4613
74.61	150.04	14.38	10.16	24.54	1.1196	2.8446	3.0570
99.59	150.04	12.66	13.15	25.80	1.0114	2.7262	2.9078
100.00	150.04	12.74	13.26	26.00	1.0036	2.7053	2.8854
19.69	150.04	8.98	9.41	18.39	1.5094	3.7900	4.0795
49.95	150.05	7.13	7.77	14.90	1.9247	4.6528	5.0352
75.28	150.04	7.36	7.94	15.30	1.7652	4.5747	4.9034
100.00	140.17	7.67	8.06	15.72	1.5604	4.1762	4.4582
20.25	173.02	7.44	8.19	15.62	1.9385	5.1881	5.5384
49.84	198.30	7.66	8.15	15.81	2.1461	5.8927	6.2713
74.70	204.55	7.42	8.11	15.53	2.2391	6.1933	6.5857
100.00	194.70	7.46	8.11	15.56	2.1272	5.8837	6.2564

표 4 실측 리액턴스 값과 2차 보간 리액턴스 계산 값

Table 4 Comparison between real reactance and quadratic interpolating reactance

변전소기준 상대거리 [km]	실측 리액턴스 [Ω] X_{real}	2차 보간 리액턴스 [Ω] $X_{interpol}$	오차 [Ω] $ X_{real} - X_{interpol} $	오차율 $\frac{ X_{real} - X_{interpol} }{X_{real}} \times 100$
(SS) 0	0.324	0.324		
2.394	1.231	1.284	0.053	4%
6.045	2.287	2.287		
9.187	2.845	2.702	0.143	5%
(PP1) 12.313	2.705	2.705		
13.933	3.790	3.762	0.028	1%
16.422	4.653	4.653		
18.506	4.575	4.715	0.140	3%
(PP2) 20.540	4.176	4.176		
22.133	5.188	5.081	0.107	2%
24.461	5.893	5.893		
26.417	6.193	6.106	0.087	1%
(SP) 28.407	5.884	5.884		

제 측정된 리액턴스 값을 비교하여 그림 4에 나타내었다.

세 구간(SS-PP1, PP1-PP2, PP2-SP)에 총 15 지점(한 구간에 5개의 지점)에서의 지락시험 데이터 중 각 구간의 처음 지점, 중간 지점 그리고 마지막 지점의 3개 지점을 기저수 데이터로 활용하여 곡선을 그렸다. 그래프의 가독성을 돕기 위해 15개 지점의 실제 데이터를 선형 보간법으로 표현하여 2차 보간 함수와 비교를 하였다. 또한 남은 6개 지점의 리액턴스 데이터와 2차 보간 함수를 통해 추정된 리액턴스 값의 오차를 표 4에 나타내었다.

실측 리액턴스 값과 2차 보간 리액턴스 값 사이의 오차는 0.053~0.143 [Ω]으로 실측 값과 근사한 것을 확인할 수 있다. 또한 선형 보간 그래프와 2차 보간 그래프가 유사한 경향성을 나타내는 것으로 보아 2차 보간 함수의 유용성을 판단할 수 있다.

3. 결 론

본 논문에서는 기존 리액턴스 방식의 고장점 표정 기술에 2차 보간법을 적용하여 전차선로 임피던스를 산출하는 기법을 제시하였다. 먼저 기존 운영 방식을 검토하고 이를 개선하기 위해 교류 전기철도 급전계통 해석을 통한 전차선로 임피던스 및 리액턴스 계산식을 도출하고, 전력계통해석프로그램의 모델링 및 고장 시뮬레이션을 통해 계산식을 검증하였다. 또한 검증된 계산식이 2차 함수의 특성임을 확인하여 이에 적합한 2차 보간법을 적용하여 리액턴스 실측 값과 비교 분석을 수행하였다. 그 결과 2차 보간법을 적용한 리액턴스 값이 실측 리액턴스 값과 상당히 근사함을 확인하였으며, 선형 보간 곡선과 2차 보간 곡선의 경향성도 유사함을 확인하였다.

본 논문에서 제시한 2차 보간법을 이용한 리액턴스 산출기법을 통해 기존 리액턴스 측정을 위해 한 구간 당 5개 지점에서의 지락사고 시험을 3개 지점에서의 시험으로 감축시킴으로써 지락 시험에 대한 시간적, 경제적 부담을 경감시킬 수 있을 것으로 판단된다. 또한 3개 지점의 지락시험을 통해 도출된 2차 보간 함수를 활용하여 다른 지점들의 리액턴스 값도 도식적이고 정량적으로 산출함으로써 보다 정밀한 고장점 표정을 할 수 있을 것으로 사료된다.

감사의 글

본 연구는 국토교통부 철도기술연구사업의 연구비지원에 의해 수행되었습니다.

References

[1] Korea Rail Network Authority, "KR E-02120 electric railway power device test", KR Code, pp. 81-82, 2014
 [2] IEEE Std C37.114™, 『IEEE Guide for Determining Fault Location on AC Transmission and Distribution Lines』,

pp. 11, 2014.

[3] Korea Rail Network Authority, "KR E-04050 ground", KR Code, pp. 8-14, 2016
 [4] Hosung Jung, Hyungchul Kim, Sang-Hoon Chang, Joorak Kim, Myung-Hwan Min, Tae-Pung An, Sung-Il Kwon, "A Study on a Catenary Impedance Estimation Technique using Boosting Current Compensation Based on Current Division Characteristics of an AT Feeding System", Journal of Electrical Engineering & Technology, pp. 1370-1376, 2015.
 [5] Hosung Jung, "A Study on Real Time Catenary Impedance Estimation Technique using the Synchronized Measuring Data between Substation and Train", The transactions of The Korean Institute of Electrical Engineers, no. 10, pp. 1458-1464, 2013.
 [6] Steven C. Chapra, Raymond P. Canale, 『Numerical Methods for Engineers sixth edition』, Mc Graw Hill, pp. 491-494, 2008.
 [7] Kim Joorak, Lee Changmu, Jung Hosung, Moonseob Han, Kim Junghoon, "Test Result of short circuit in Kyungbu High Speed Railway", 2006 Conference of the Korean Society for Railway, pp. 22-27. 2006.

저 자 소 개



민 명 환 (Myung-Hwan Min)

1981년 2월 8일생. 2010년 숭실대학교 전기공학과 졸업(학사). 2012년 성균관대학교 전기전자 및 컴퓨터공학부 졸업(공학석사). 2013~현재 인텍전기전자(주) 전력전자시스템 연구소 선임연구원
 Tel : 031-299-8420
 Fax : 031-299-8401
 E-mail : mhmin@entecene.co.kr



안 태 풍 (Tae-Pung An)

1992년 2월 성균관대학교 전자공학과 졸업(공학사), 1992년 2월~1996년 5월 일진전기공업(주) 기술연구소. 1996년 6월~현재 인텍전기전자(주) 기술연구소 전무 이사
 Tel : 031-299-8410
 Fax : 031-299-8401
 E-mail : tpan@entecene.co.kr



권 성 일 (Sung-Il Kwon)

1967년 12월 10일생. 1996년 충주대 전기공학과 졸업. 2012년 충북대 전기전산공학과 졸업(석사). 1992년~현재 한국철도공사 연구원 철도시스템개발연구단장

Tel : 042-615-5411

Fax : 02-361-8211

E-mail : kwon1911@korail.com



정 호 성(Hosung Jung)

1971년 10월생. 1998년 성균관대학교 전기공학과 졸업(공학석사). 2002년 성균관대학교 전기전자 및 컴퓨터공학부 졸업(공학박사). 2002~현재 한국철도기술연구원 책임연구원, 기술전략실장

Tel : 031-460-5116

Fax : 031-460-5459

E-mail : hsjung@krri.re.kr