

직류급전계통에서의 레일전위 상승 분석 및 억제 방안 연구

논문
60-3-33

An Analysis on Rise of Rail Potential And A Study on Control Method for It in DC Feeding System

민명환* · 정호성[†] · 박영** · 김형철*** · 신명철[§]

(Myung-Hwan Min · Hosung Jung · Young Park · Hyengchul Kim · Myong-Chul Shin)

Abstract - Nowadays, in metropolitan railroad, DC feeding system is being generally applied. In order to reduce damages of electro-chemical corrosion caused by stray current and leakage current, in DC feeding system, rail is used as negative-polarity return conductor for traction load current. However, it has problem of rail potential increase and there are no adequate measures to prevent it in domestic.

In this paper, we presented fundamental theory and related standards about rail potential increase. And then, we analyzed field testing data and simulated a variety of operations by using PSCAD/EMTDC as an analysis program of power system. In addition, voltage control device is suggested to prevent accidents caused by rail potential increase.

Key Words : - DC feeding system, Rail potential, Stray current, Leakage current

1. 서론

오늘날 도시철도의 경우 일반적으로 직류급전시스템을 채용하고 있으며 레일을 운행전류의 귀선로로 사용하고 있다. 또한 누설전류로 인한 지하매설물의 전식의 피해를 감소시키기 위해, 비접지시스템(Floating System)을 적용하고 있다. 하지만 비접지시스템에서는 레일전위상승으로 인한 위험이 상존하고 있고, 아직 국내 도시철도에서는 레일전위 상승에 대한 대책이 없는 실정이다. 또한 최근 스크린도어의 설치가 증가함에 따라 스크린도어 발판과 차량출입문 사이의 아크발생사고가 점점 증가하고 있다.

본 논문에서는 레일전위 상승의 원리와 안전범위를 제시하고 현장시험에서의 레일전위 상승을 분석하였다. 또한 전력계통해석 프로그램인 PSCAD/EMTDC를 활용하여 다양한 상황에서의 운전 시뮬레이션을 수행하여 레일전위 상승 요인을 분석하였다. 또한 안전전압범위를 초과하는 높은 레일전위 발생 시 전압제한장치의 사용으로 인명 피해나 사고의 방지 방안을 제시하였다.

2. 본론

2.1 레일전위 상승원리

직류급전 계통에서는 운행을 위한 레일을 일반적으로 전

- * 정 회 원 : 성균관대 전기전자 및 컴퓨터학과 석사과정
- ** 정 회 원 : 한국철도기술연구원 전철전력연구실 선임연구원
- *** 정 회 원 : 한국철도기술연구원 전철전력연구실 실장
- § 펠로우회원 : 성균관대 전기전자 및 컴퓨터학과 교수
- † 교신저자, 정회원 : 한국철도기술연구원 전철전력연구실 선임연구원

E-mail : hsjung@krii.re.kr

접수일자 : 2011년 1월 3일

최종완료 : 2011년 2월 8일

동차 부하에 공급된 전류의 귀선도체(Negative Conductor)로 사용하여 귀선전류 도체 설치의 비용을 절감하고 있다. 하지만 선로를 따라 대지 위에 설치된 레일은 대지와 절연을 시키지만 완전 절연은 불가능하여 대지로 전류가 누설될 수 있으며, 이러한 누설전류(leakage current or stray current)는 레일 주변에 설치된 지하매설물에 전식을 일으킨다. 또한 레일에 전위차를 발생시켜 레일 주위의 인체에 위험을 초래할 수도 있다. 이러한 누설전류를 줄이기 위해 직류급전 계통에서는 비접지 방식을 사용한다. 비접지방식은 접지방식보다 보다 4배 이상 누설전류를 감소시킬 수 있다 [1]. 그림 1은 직류급전방식에서의 전류 흐름도와 레일전위를 나타낸 것이다. 레일전위는 차량위치에서 대지전위(Earth voltage)를 기준으로 +전위가 나타나고 변전소 위치에서는 -전위가 발생한다. 즉 전동차에서부터 누설전류가 레일에서 대지로 흐르고, 이 지점의 레일전위는 대지의 전위보다 높은 +전위가 된다. 또한 중간점을 지나면 대지에서부터 레일로 누설전류가 흐르고, 그 지점의 레일전위는 -전위가 된다 [2][3]. 이러한 레일전위가 사람이 많은 역 내, 또는 차량기지에서 높은 전위를 나타낸다면 접촉전압사고나 아크사고로 인체에 피해를 줄 수 있다.

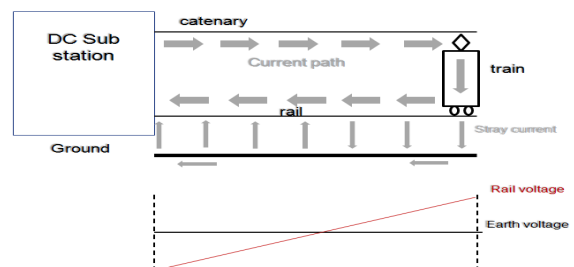


그림 1 비접지방식의 레일전위 분포

Fig. 1 Distribution of rail potential in floating system

2.2 안전전압에 관한 국제기준 (IEC 62128-1)

높은 전위로 인한 인체 위협에 대한 사고를 방지하기 위해 국제적으로 전위값을 제한하고 있다. 국제기준 IEC 62128-1(Railway applications- Fixed installations - Part 1 : Protective provisions relating to electrical safety and earthing)에서는 지속시간에 따른 전위(접촉전압, 신체허용 전압)의 크기한도를 제시하고 있다.

이 기준은 표 1에서와 같이 지속시간을 세 가지 조건으로 규정하고 있다. 여기서 짧은 시간은 고장조건을, 일시적 영구적 시간은 정상조건일 때를 의미한다.

표 1 지속시간 정의

Table 1 Definition of running time

조건	t[s]
짧은 시간	≤0.5
일시적	0.5 < t ≤ 300
영구적	> 300

표 2와 표 3에서 같이 짧은 시간 조건(고장조건)에서의 최대허용접촉 전압은 395~940[V], 일시적 시간 조건에서의 최대신체접촉 전압은 150~310[V], 영구적 조건에서는 120[V] 까지 제한하고 있다. 특히 작업장이나 이와 유사한 장소에서는 60[V] 이내로 규정하고 있다.

표 2 짧은 시간 조건에서의 최대허용접촉 전압

Ut : the touch voltage(rms) in V

Table 2 Maximum Short Term Accessible Voltage Levels (Ut : the touch voltage(rms) in V)

t [s]	Ut [V]
0.02	940
0.05	770
0.1	660
0.2	535
0.3	480
0.4	435
0.5	395

표 3 일시적 시간 조건에서의 최대신체접촉 전압

Ua : the accessible voltage(rms) in V

Table 3 Maximum Accessible Voltage for temporary conditions (Ua : the accessible voltage(rms) in V)

t [s]	Ua [V]
0.6	310
0.7	270
0.8	240
0.9	200
1.0	170
≤ 300	150

위의 허용 전압을 기준으로 정상 및 고장 시의 레일전위를 측정해야 하고, 허용전압 초과 시 적절한 조치를 취해야 한다.

2.3 현장시험 분석

2.3.1 측정 방법

레일전위상승을 분석하기 위해 광주도시철도의 평동역과 대전도시철도의 월드컵경기장역에서 레일전위 측정시험을 실시하였다. 그림 2는 역 내의 레일(한 부분)에서 측정선을 결선한 것(좌)과, 기준이 되는 대지의 전위 부분과 연결하기 위해 스크린도어의 접지단자에 다른 측정선 결선한 것(우)을 보여준다. 그림 3은 레일과 결선한 측정선과 접지단자와 결선한 측정선을 LabVIEW 측정장비에 연결하여 측정하고 그 측정값을 PC와 연동하여 실시간으로 레일전위를 디스플레이하는 장면이다. 이와 같은 방법으로 24시간 동안의 레일전위를 측정하였다.



그림 2 레일과 측정선 결선(좌), 스크린도어 접지 단자와 측정선 결선(우)

Fig. 2 connecting measurement wire to rail (left), and to an earthing terminal (right)

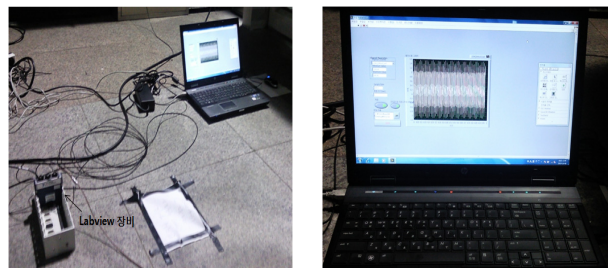


그림 3 LabVIEW 장비를 이용한 레일전위 측정 장면

Fig. 3 Measurement of rail potential by using LabVIEW equipment

2.3.2 레일전위 측정 데이터 분석

한 지점에서 대지전위를 기준으로 제동 시는 (-)레일전위, 주행 시는 (+)레일전위가 발생된다. 그림 4는 한 시간 동안 한 지점에서의 레일전위 분포를 나타낸다. 그림에서와 같이 한 지점에서의 레일전위는 (+)전위, (-)전위로 변동을 거듭하는 것을 확인할 수 있다.

표 4는 광주 평동역에서 시간대별 레일전위(최고, 최저값)을 나타낸 것이고, 측정치의 최고전위는 +62.21[V], 최저전위는 -59.87[V] 이었다. 또한 표 5는 대전 월드컵경기장역의 시간대별 최고최저 전압을 나타낸 것이다. 측정치의 최고전위는 44.56[V], 최저전위는 -33.01[V]로 측정되었다.

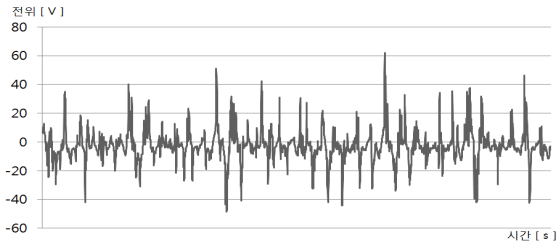


그림 4 15:30 ~ 16:30 사이의 레일전위 분포
Fig. 4 Rail potential between 15:30 and 16:30

표 4 광주 도시철도 평동역의 레일전위

Table 4 Rail potential of Pyeongdong station in Gwangju metro

측정시간	최고전압[V]	최저전압[V]
18:00~20:00	50.71	-54.24
20:00~22:00	46.22	-47.51
22:00~20:00	51.07	-45.47
18:00~24:00	57.47	-54.81
05:00~07:00	55.19	-59.87
07:00~09:00	56.59	-49.88
09:00~11:00	48.72	-47.67
11:00~13:00	55.87	-53.60
13:00~15:00	62.21	-51.57

표 5 대전 도시철도 월드컵경기장역의 레일전위

Table 5 Rail potential of Worldcup stadium station in Daejeon metro

측정시간	최고전압[V]	최저전압[V]
18:00~20:00	44.56	-26.83
20:00~22:00	25.25	-22.92
22:00~20:00	15.77	-21.27
18:00~24:00	26.04	-25.55
05:00~07:00	36.74	-33.01
07:00~09:00	24.76	-28.42
09:00~11:00	28.12	-26.34
11:00~13:00	31.11	-28.48
13:00~15:00	17.48	-29.89

측정결과 광주와 대전의 경우, 최고전압이 IEC 62128-1에서 규정하는 영구적 조건(120[V])의 허용전압 이내에 있음을 확인할 수 있었다. 레일전위가 안정적인 범위에 있다는 것은 레일의 저항 및 레일과 대지 사이의 절연 상태가 양호하고, 또한 부하량의 크기(승객 수, 전차의 시격)가 안정적인 것이라 예측할 수 있다. 하지만 수도권 도시철도의 경우, 승객의 수가 매우 많으며 전차의 시격 또한 광주나 대전 도시철도보다 짧기 때문에 부하량이 광주나 대전의 경우보다 불안정하고 레일의 절연상태 또한 양호하지 않을 수 있다.

2.4 레일전위 시뮬레이션

레일 저항, 레일과 대지 사이의 절연상태, 부하량 크기의 변화에 따른 레일전위를 파악하기 위해 전력계통해석 프로

그램인 PSCAD/EMTDC를 사용하여 시뮬레이션을 수행하였다.

그림 5의 좌측부분은 직류 급전계통을 모델링 한 것으로서, 교류 22,900[V]를 수전 받아 전동차 공급전압인 직류 1,500[V]로 전압을 변환하는 직류변전소로 교류전원, 변압기 및 정류기로 구성하였고, 우측부분은 전차선로(R_power), 레일(R_rail), 누설전류 포집망(R_mat) 및 지하매설물(R_pipe)로 구성되어 모델링하였다. 각각의 파라미터는 표 6의 기준값으로 설정하고, 부하의 크기도 정격운전전압 1500[V]가 되도록 저항소자로 모델링하였다[4].

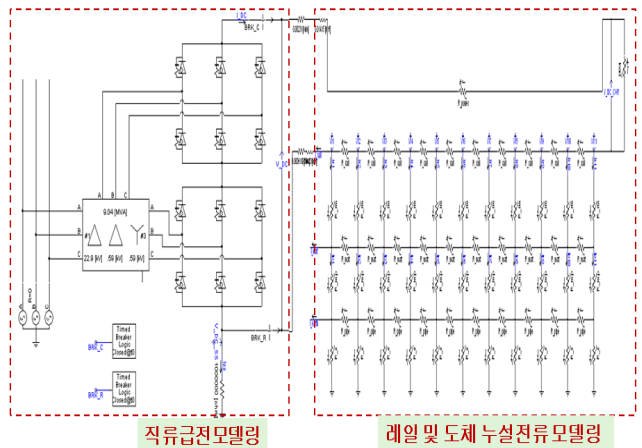


그림 5 직류 급전계통 모델링
Fig. 5 Modeling of DC feeding system

표 6 부분별 기준 값

Table 6 Reference values of components

model	component	reference value
R_power	Catenary	0.0203 Ω/km
R_rail	Rail	0.074 Ω/km
R_mat	Leakage current -collecting mat	0.5 Ω/km
R_pipe	Underground metal infrastructure	1.437 mΩ/km
-	Positive feeder	2.31mΩ+0.01415 mH
-	Negative feeder	0.615mΩ+0.00423 mH

첫 번째로, 부하량 변화에 따른 레일전위 상승을 확인하기 위해 차량의 최저운전전압인 1000[V]가 되게 하여 시뮬레이션을 하였다. 그림 6은 정격부하일 때와 과부하(최대부하)일 때의 레일전위 값을 비교한 것이다. 레일저항, 레일과 대지사이의 절연 상태, 부하량의 크기가 기준 값 일 때의 레일전위는 변전소 부근이 -25[V], 차량부근의 레일전위가 25[V]로 매우 양호한 값이 나오는 것을 확인할 수 있다. 하지만 과부하의 경우 그 결과, 레일전위가 -160~160[V] 까지 나타나는 것을 확인할 수 있다.

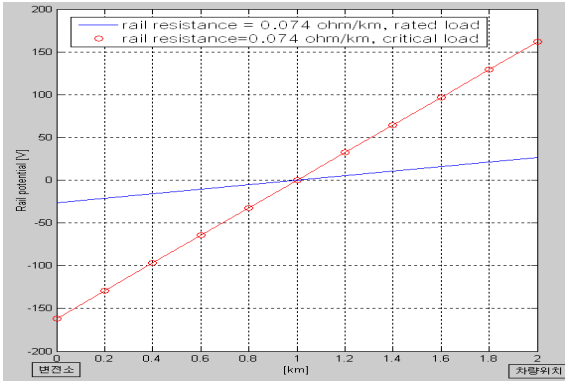


그림 6 부하량 변화에 따른 레일전위
 Fig. 6 Change in rail potential depending on variation of load

둘째, 레일의 절연상태의 변화에 따른 레일전위 변동을 확인하기 위해 레일저항의 크기를 기준 값의 2배, 5배 증가시켜 시뮬레이션을 수행하였다. 그림 7은 레일의 절연상태 변화에 따른 레일전위값을 비교한 것이다. 그 결과 레일저항의 크기가 커질수록 레일전위가 높아지는 것(레일저항 기준값의 2배 일 때는 -50~50[V], 5배일 때는 -115~115[V])을 확인하였다.

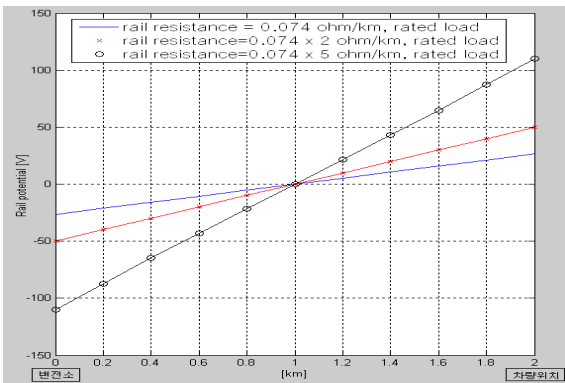


그림 7 레일절연상태 변화에 따른 레일전위
 Fig. 7 Change in rail potential depending on variation of rail insulation condition

셋째, 부하량의 변화와 레일의 절연상태 변화, 두 경우의 변화에 따른 레일전위의 변화를 확인하기 위해 과부하일 때 레일저항의 값을 변동시키며 시뮬레이션을 하였다. 그림 8은 그 결과를 비교한 것이다. 과부하상태에 레일저항의 값이 2배가 되었을 때 -270~270[V]의 레일전위가 발생하였고, 절연도가 더 낮아졌을 때(레일저항 기준 값의 5배)는 -430~430[V]의 매우 큰 전위차를 나타내는 것을 확인하였다.

시뮬레이션 결과, 부하량의 크기가 커질 때(열차의 시격이 짧거나, 승객의 수가 많을 때)와 레일의 절연상태가 양호하지 않을 때 레일전위가 높게 나타나는 것을 확인하였다. 특히 차량에서 가장 높은 레일전위가 나타나는데 이는 앞에서 제시한 허용전압 범위를 초과하여 사고의 위험을 초래할 수 있으므로 이를 방지하기 위한 조치가 필요하다.

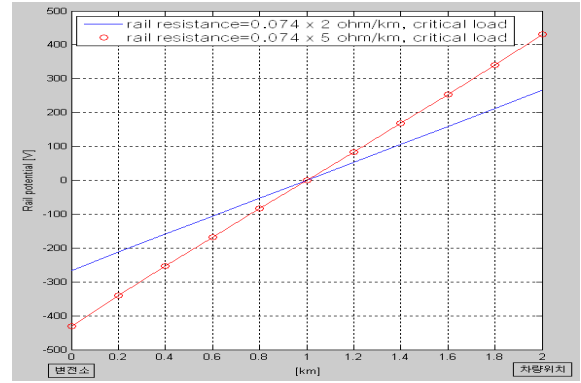


그림 8 부하량과 레일저항의 변화에 따른 레일전위
 Fig. 8 Change in rail potential depending on variation both load and rail insulation condition

2.5 레일전위 상승 억제 방안

2.4절의 시뮬레이션을 통해 레일저항, 부하량 변화에 따라 인체에 피해를 줄 수 있는 허용범위 이상의 레일전위가 발생할 수 있음을 확인할 수 있다. 허용범위를 초과하는 높은 레일전위로 인해, 열차가 정차하는 승객들이 많은 역에서의 높은 레일전위는 치명적인 사고를 초래할 가능성이 있다. 이러한 사고를 방지하기 위해 높은 레일전위가 발생하는 장소와 인명피해가 우려되는 차량기지과 역 내에 전압을 제한하는 전압제한장치의 설치를 제안한다.[5]

그림 9는 전압제한장치를 개요도를 나타낸다. 레일전위가 허용전압을 초과 시에 레일과 역 내의 접지 단자를 연결하여 순간적으로 접지시키는 방법이다.

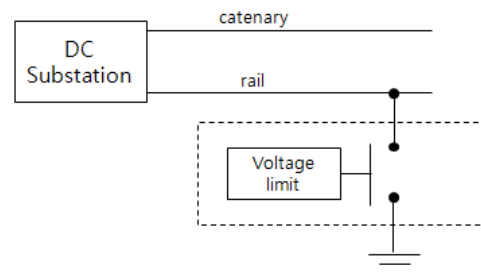


그림 9 전압제한장치
 Fig. 9 Voltage limit device

표 7 GTO Thyristor 의 사양
 Table 7 Specification of GTO Thyristor

Symbol	Parameter	Ratings	Unit
I_{TQRM}	Repetitive controllible on-state current	4000	A
$I_{T(AV)}$	Average on-state current	1200	A
V_{DRM}	Repetitive peak off state voltage	4500	V
t_{gt}	Turn-on time	8	μs
t_{gq}	Turn-off time	35	μs

접지스위치로는 GTO Thyristor를 사용하여 큰 전류가 접지극으로 흐를 수 있게 한다. GTO Thyristor는 표 7에서와 같이 4500[V]의 연속적인 높은 전압과 4000[A]의 큰 전류까지 허용할 수 있어 직류급전계통에서 접지스위치로 사용하기에 적합하다. 이러한 접지스위치를 사용하여 허용전압을 초과하는 높은 레일전위 발생 시 일시적으로 안전전압 기준 이내의 전압으로 낮추어 피해를 방지하는 할 수 있다. 그림 10은 전압제한장치를 사용하였을 때의 시뮬레이션을 수행했을 때, 레일전위 변화를 보여준다. Vrail은 레일전위, Vcontrol 은 접지 스위치를 사용하였을 때의 레일전위를 나타내고 GTO의 동작 파형이다. 허용전압을 -120[V]와 120[V]로 설정하고, 레일전위가 120[V]를 초과하였을 때, -120[V]이하로 내려갈 때, 접지스위치가 동작하고 순간적으로 레일전위를 안전전압으로 제한한다. 따라서 레일전위는 허용전압을 초과하지 않는 것을 확인할 수 있다.

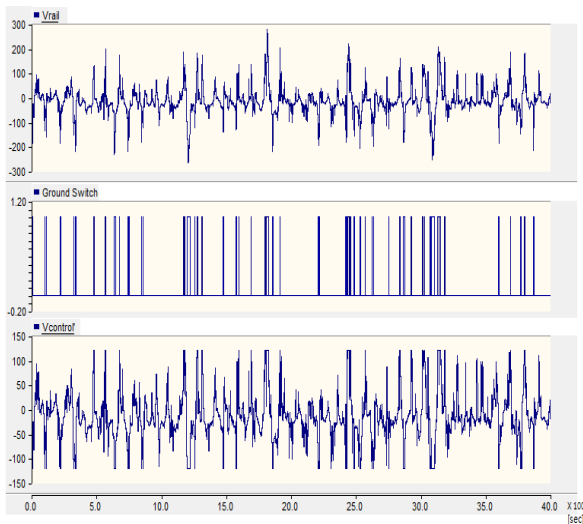


그림 10 전압제한장치 설치 전과 설치 후의 레일 전위 변화
 Fig. 10 Change in rail potential before and after installation of voltage limit device

3. 결 론

본 논문에서는 비접지 직류급전시스템에서 문제가 되는 레일전위상승에 대해 다루고 현장시험 및 시뮬레이션 수행을 통해 레일전위상승에 대해 분석하였다. 또한 레일전위가 인체에 위험을 줄 수 있는 허용전압을 초과할 때, 전위를 제한하기 위한 방안을 마련하였다.

현장시험을 통해 레일전위분포를 확인하였고, 시뮬레이션 수행을 하여 레일저항, 부하량 크기의 변화에 따른 레일전위 변화를 확인하였다. 레일저항이 클수록, 레일과 대지의 절연 상태가 불량할수록, 부하량 크기(승객 수, 전동차의 시격)가 불안정할수록, 레일전위가 인체에 위험을 줄 수 있는 허용전압을 초과하는 것을 확인할 수 있었다. 또한 레일전위가 허용전압을 초과하였을 때, 레일전위를 안전범위 이내로 제어하는 전압제한장치의 사용을 적용하여 레일전위상승으로 인한 인명피해나 사고를 방지할 수 있다.

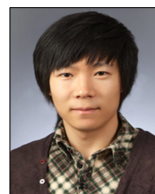
감사의 글

본 연구는 국토해양부 도시철도표준화2단계연구개발사업의 연구비지원(07도시철도표준화A01)에 의해 수행되었습니다.

참 고 문 헌

- [1] 조웅기, “직류전기철도 급전시스템에서 레일전위 해석을 위한 모델링”, 한국조명·전기설비학회, 조명·전기설비학회논문지, 제24권 제6호, pp. 138-146, 2010.6.
- [2] 한문섭, “직류철도의 레일누설전류 및 전위 평가”, 한국철도학회논문집 제 12권 제1호 (통권50호), pp. 161-166, 2009.2.
- [3] 정상기, “비접지 급전시스템에서의 레일전위상승과 누설전류 계산”, 한국철도학회 2006년도 추계 학술대회논문집, pp. 8-12, 2006.11.
- [4] Myunghwan Min, “A Study on the Real Time Measuring Technique of Return Current in the DC Railway System”, 16th International Conference on Electric Engineering, July 2010.
- [5] M.Niasati, A.Gholami, “Evaluation of Rail Potential Control Devices Performance for Control of Rail Potential of DC Electrified Railway Systems”, International Conference on Railway Engineering, march 2008.

저 자 소 개

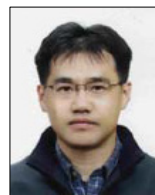


민 명 환 (閔明煥)

1981년 2월 8일생. 2010년 숭실대학교 전기공학과 졸업(학사). 2010년~현재 성균관대학교 전기전자 및 컴퓨터공학부 석사과정.

Tel : 031-290-7161

E-mail : mhmin@skku.ac.kr



정 호 성 (鄭滿聖)

1971년 10월 4일생. 1998년 성균관대학교 전기공학과 졸업(공학석사). 2002년 성균관대학교 전기전자 및 컴퓨터공학부 졸업(공학박사). 현재 한국철도기술연구원 전철전력연구실 선임연구원

Tel : 031-460-5116

Fax : 031-460-5459

E-mail : hsjung@krri.re.kr



박 영 (朴 暎)

1973년 11월 3일생. 2000년 성균관대학교 전기전자 및 컴퓨터공학부졸업(공학석사). 2004년 동대학원 동학과 졸업(공학박사). 현재 한국철도기술연구원 전철전력연구실 선임연구원

Tel : 031-460-5424
Fax : 031-460-5459
E-mail : ypark@krri.re.kr



김 형 철 (金 炯 徹)

1967년 9월 30일생 1993년 고려대학교 전기공학과 졸업 공학석사. 2003년 Texas A&M University 전기공학과졸업(공학박사). 현재 한국철도기술연구원 전철전력연구실 실장

Tel : 031-460-5450
Fax : 031-460-5459
E-mail : hckim@krri.re.kr



신 명 철 (申 明 澈)

1970년 성균관대 전기공학과 졸업.
1978년 연세대학교 대학원 전기공학과졸업(박사). 1975년~1978년 충북대학교 전기공학과 조교수.
2000년~2001년 미국펜실바니아 주립대학교 방문교수.

1978년~현재 성균관대학교 전기전자 및 컴퓨터공학부교수.
2005년~2007년 대한전기학회장.
2005년~2007년 성균관대학교 자연과학캠퍼스 부총장
Tel : 031-290-7103
Fax : 031-290-7168
E-mail : mcshin@yurim.skku.ac.kr