

전동차 회생 에너지활용에 따른 에너지 및 CO₂ 절감 분석에 관한 연구

(A Study on Reduction of Energy and CO₂ Emission by Using Regenerative Energy of Electric Vehicle)

김철섭* · 안천헌 · 이병승 · 이희성**

(Chul-Sub Kim · Cheon-Heon An · Byung-Song Lee · Hi Sung Lee)

Abstract

The recent environmental protection trend requires more strict energy saving, therefore every transportation system should reduce energy consumption to the minimum value. High-efficiency operation system, energy saving and CO₂ emissions shall be addressed as important issues in railway system. These issues are the most essential factors of railway, compared to major public transportation system. Recently, saving energy in the electric railway system has been studied. The efficient use of regenerated energy is considered to save energy.

Namely, Using regenerative energy is that to store the energy generated during braking and discharge it again when a vehicle accelerates. Reusing energy stores and discharges energy, consequently enables a complete exchange of energy between vehicles, even if they are not braking and accelerating at precisely the same time, as is most frequently the case in everyday service. This paper analyzes effects of energy saving and CO₂-cut by using regenerative energy of electric vehicles.

Key Words : Energy Saving, CO₂-cut, Energy Storage System, Regenerative Energy

1. 서 론

현재 전기철도에서 운행하는 전동차는 감속 시 견인 전동기가 발전기로 동작하여 전기에너지를 만들게 되는데 이 에너지를 회생에너지라고 한다. 회생에너지

는 전동차가 사용한 에너지의 약 45[%] 정도로 많은 양이 발생하지만 이중 절반이상이 불필요한 열발생으로 사라지고 있다. 즉 전동차는 사용한 에너지의 약 45[%]를 발전기처럼 만들어 내고 주변에 있는 역행 전동차가 있으면 약 10~20[%] 정도만 활용하고 나머지는 전동차 내 저항기 또는 전차선의 저항에 의해 열로서 사라진다. 즉 현재 회생에너지 중 주변 전동차에 소비에너지의 10~20[%] 정도만 활용이 되고 있으며 25~30[%]는 전차선에서 열로 사라지게 된다. 이렇게 사라지는 회생에너지를 활용하기 위해 회생에너

* 주저자 : 한국철도공사 광역철도본부 차량운용부장

** 교신저자 : 서울과학기술대학교 철도차량시스템공학과 교수

Tel : 02-970-6877, Fax : 02-976-6877

E-mail : hslee@snut.ac.kr

접수일자 : 2010년 5월 18일

1차심사 : 2010년 6월 5일, 2차심사 : 2010년 7월 19일

심사완료 : 2010년 7월 28일

지 저장장치가 적용된다[1-3].

회생에너지 저장장치는 회생 시 회생전력이 한전으로 넘어갈 수 없는 다이오드 방식의 직류 도시철도 구간에서 전동차 제동 시 발생한 회생에너지를 저장하고, 저장된 에너지를 전동차 역행 시 전동차에 공급한다. 따라서 회생에너지 저장장치는 전동차가 멈출 때 발생하는 회생에너지의 양을 스스로 판단하여 저장하였다가 전동차가 다시 운행할 때 저장된 에너지를 공급하여, 에너지를 절약할 수 있게 해준다[4-5].

현재 정부에서는 2020년까지 국가온실가스 감축을 배출전망치 대비 최대 30[%]를 절감하는 것을 목표로 제시하였다. 국가 온실가스 배출의 17[%]를 차지하고 있는 교통부문에서는 온실가스를 2020년까지 배출전망치 대비 33~37[%]를 감축해야 한다. 따라서 도시철도 운영기관은 에너지 절감을 위해 방안을 모색해야 할 것이다[6]. 회생에너지 저장장치 도입을 위해 최근 논문에서 서울메트로 2호선을 대상으로 현장 실측 및 시뮬레이션을 통해 전력시뮬레이션의 효용성을 검증하였다[7-12]. 따라서 본 논문에서는 주요 전국노선을 대상으로 회생에너지 저장장치 도입기준 분석, 운행시격과 에너지절감을 관계 및 전동차 편성 차량수와 투자비 회수기간과의 관계, 운행시격별 에너지절감을 분석, 국가온실가스 감축을 위한 CO₂ 절감에 관하여 분석한다.

2. 전력시뮬레이션 알고리즘

전력시뮬레이션을 위해서는 차량 특성곡선, 역사 위치, 구배, 곡선 등과 같은 선로 데이터, 변전소 위치, 소스 저항 등의 네트워크 데이터, 차량 운행데이터 등이 필요하다. 이러한 관계를 그림 1에 나타낸다.

전동차 운전모드는 수동운전모드와 자동운전모드가 있으며, 두 운전모드에 따라 회생제동시 발생하는 회생전력량이 다르게 나타난다. 수동운전모드는 기관사의 운전패턴에 따라 달라지므로 같은 구간을 운전할 때마다 수만 가지의 경우의 수가 발생한다. 따라서 시뮬레이션은 동일 구간을 항상 일정하게 운행하고, 회생에너지를 발생하는 자동운전모드의 개념으로 수행하게 된다. 차량데이터, 선로데이터, 운행데이터의 입

력 조건을 통해 자동운전모드의 차량 특성 시뮬레이션(TPS)이 수행이 된다. 그 결과로서 전동차 위치 및 시간에 따른 소비전력, 회생전력이 계산된다. 소비전력 및 회생전력은 네트워크데이터 및 운행데이터와 함께 입력조건이 되어 전력시뮬레이션이 수행된다.

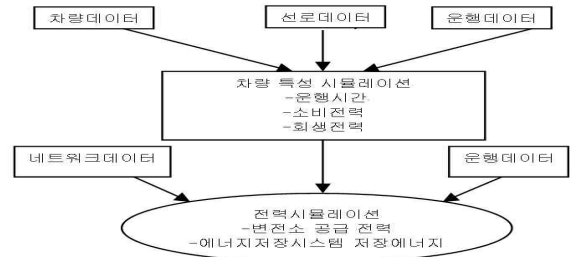


그림 1. 전동차 운전특성에 따른 전력조류계산 시뮬레이션
Fig. 1. Load flow simulation

전력시뮬레이션을 위해 전동차는 하나의 등가회로로 표시되는데, 전동차의 위치에 노드를 만들고 이 노드에 등가회로를 연결한다. 전동차의 위치에 따라 다른 노드와 사이의 컨덕턴스가 달라지므로 노드 방정식의 파라미터가 전동차의 위치에 따라 변하게 된다. 전동차의 소비전력 역시 전동차의 위치에 따라 변한다. 전동차의 위치는 아래의 식에 의해 구할 수 있다.

$$2 \cdot a \cdot S = V_n^2 - V_o^2 \tag{1}$$

$$V_n = V_o + a \cdot t$$

에 의해서 계산된다.

여기서

- a : 가속도 혹은 감속도
- S : Old Location으로부터의 진행 거리
- V_n : Speed at new location
- V_o : Speed at old location
- t : Time step

전력시뮬레이션은 전력공급시스템의 각 구성요소인 변전소, 전차선, 레일, 전동차를 그림 2와 같이 전기적 등가회로로 변환하고 파라미터로서 회로를 구성하며, 수식을 이용하여 계산한다.

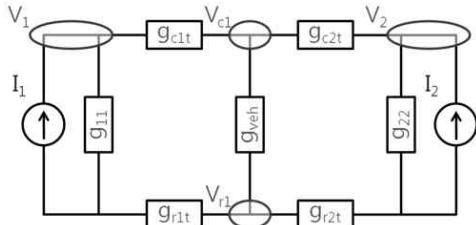


그림 2. 철도변전소, 전동차, 선로를 고려한 철도시스템 등가회로

Fig. 2. Equivalent railway system

$$\begin{bmatrix} g_{11}+g_{dt} & 0 & -g_{dt} & 0 \\ 0 & g_{22}+g_{dt} & -g_{dt} & 0 \\ -g_{dt} & -g_{dt} & g_{dt}+g_{dt}+g_{veh} & -g_{veh} \\ 0 & 0 & -g_{veh} & g_{veh}+g_{rlt}+g_{rl2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_1 \\ V_2 \\ V_{cl} \\ V_{rl} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} I_1 \\ I_2 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} \quad (2)$$

여기서,

- V_1 : 1번 변전소 노드 전압
- V_2 : 2번 변전소 노드 전압
- V_{cl} : 전동차 전차선 노드 전압
- V_{rl} : 전동차 레일 노드 전압
- I_1 : 1번 변전소 소스 전류
- I_2 : 2번 변전소 소스 전류
- g_{11} : 1번 변전소 컨덕턴스
- g_{22} : 2번 변전소 컨덕턴스
- g_{veh} : 전동차 컨덕턴스
- g_{clt} : 전동차와 1번 변전소간 전차선 컨덕턴스
- g_{c2t} : 전동차와 1번 변전소간 전차선 컨덕턴스
- g_{rlt} : 전동차와 1번 변전소간 레일 컨덕턴스
- g_{rl2} : 전동차와 1번 변전소간 레일 컨덕턴스

$$g_{veh} = \frac{P_{veh1}}{(V_{cl} - V_{rl})^2} \quad (3)$$

여기서,

P_{veh1} : 전동차 위치별 역행 및 회생전력

I_1 과 I_2 는 소스전류로서 결정되어 있고 P_{veh1} 도 TPS 를 통해 전동차 위치별 전력으로서 계산된 값이므로, 반복계산법을 이용하여 각 노드의 전압의 해를 구할 수 있다.

도시철도시스템 전력조류계산 알고리즘에 회생에너지 저장장치 계산 모듈을 추가함으로써 회생에너지 저장장치가 포함된 전력조류계산이 가능하다. 그림 3 은 회생에너지 저장장치를 고려할 때, 도시철도시스템의 전력조류계산 알고리즘을 나타낸다. 매 초 차량의 위치와 운전모드에 대한 조류해석을 우선 수행한 후, 각 변전소 일정 전압값 이상이면 저장하고 이하이면 공급하도록 입력된 전압 제한치를 벗어나는지의 여부를 검사하여, 이벤트가 있을 경우 다시 계산한다.

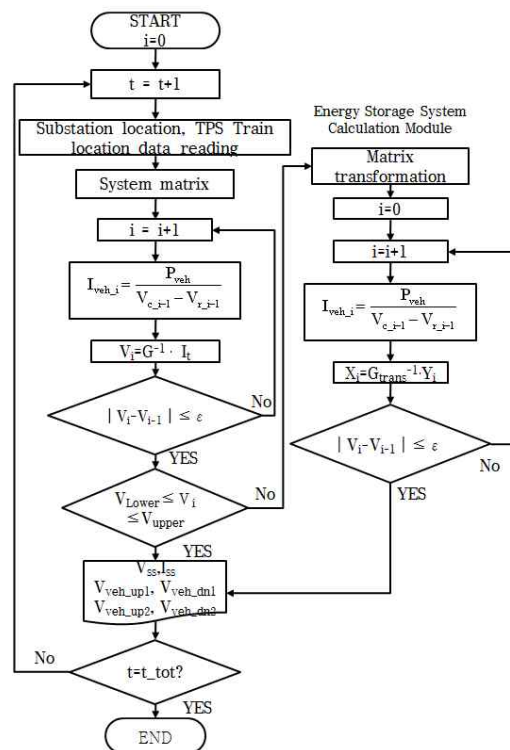


그림 3. 회생에너지 저장장치를 고려한 전력시뮬레이션 알고리즘

Fig. 3. Load flow algorithm with ESS

즉 초기 조류계산 시에 변전소 전류 및 차량 전류는 고정된 값으로서 전압값만이 변수였으나, 회생에너지 저장장치를 설치하는 경우, 변전소에서 공급되는 전류값이 달라지기 때문에 상한 또는 하한에 변전소 전압을 고정시키고 변전소 전류를 변수화하는 행렬변환하여 계산한다.

도시철도 전동차는 기동과 제동이 잦은 부하로서 소

비전력에 비해 상당히 많은 양의 회생전력을 발생시킨다. 전력시뮬레이션 계산과정에서 에너지 흐름은 그림 4와 같이 나타낼 수 있다. A Case는 n번째와 n+1 번째 전동차가 역행하는 경우로서 회생에너지 저장장치와 변전소에서 전력을 공급한다. B Case는 n번째 전동차가 제동하는 시점에, n-1번째 또는 n+1번째 차량이 기동하는 경우로서 발생한 회생에너지를 활용할 수 있게 된다. 이때는 회생에너지 저장장치는 동작하지 않는다. C Case는 n번째와 n+1번째 전동차가 모두 회생하는 경우로서 회생에너지 저장장치에 에너지가 저장된다. D Case는 회생에너지 저장장치가 없는 경우에 n번째 전동차 회생시 주변에 n-1번째 또는 n+1 번째 전동차가 없으면 회생에너지는 전차선 저항 및 전동차내 저항기로 사라지게 된다.

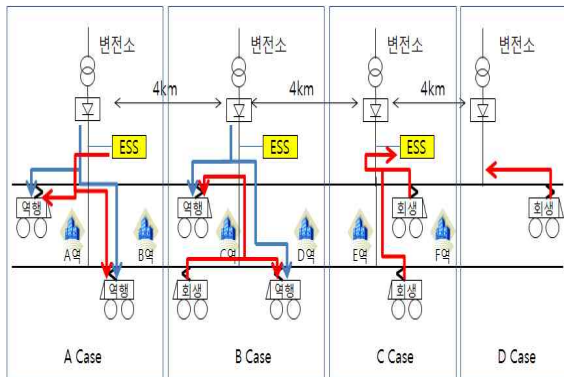


그림 4. 에너지 흐름(4가지 경우)
Fig. 4. Regenerative energy flow for 4 cases

3. 전동차 및 변전소 회생에너지 측정

운영노선에 회생에너지 저장장치를 설치·운영하기 위해 회생에너지의 실측 및 시뮬레이션을 수행하였다. 본 절에서는 전동차 및 변전소 회생에너지 실측에 대해 간략하게 분석한다.

3.1 전동차 회생에너지 측정

추진제어장치와 보조전원장치에서 동시에 소비전력량을 측정하여 차량 1편성당 소비되는 전력량을 검토 및 분석한다. 전동차 측정 개소를 그림 5에서 보여준다.

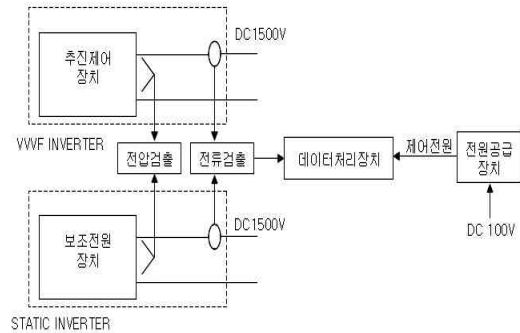


그림 5. 전동차 소비전력 측정 개소
Fig. 5. Measurement system of consumed energy of a vehicle in Seoul line 2

실시간 데이터 수집을 위한 모니터링 장치의 주 연산을 실행하는 디지털 신호처리는 TSM320c32이며 5ms의 샘플링을 통해서 데이터 값을 수집하며 이 값을 기준으로 전동차의 소비전력량과 회생전력량을 나타낸다.

- 측정구간 : 신도림 - 신도림 (내외선구간) 6회 순환
- 측정기간 : 2006년 2월 16일 ~ 2월 17일(2일)

측정결과 표 1과 같이 전동차 회생 에너지율은 42~46[%]로 발생하였으며 평균 45[%]로 나타났다.

표 1. 전동차 회생 에너지율
Table 1. Energy measurement data of Seoul line 2

구 분	1 편성 소비전력량 [kWh]	1 편성 회생전력량 [kWh]	회생율 [%]
1회	944.9	430.29	45.5
2회	1220.22	566.43	46.4
3회	1088.77	494.44	45.4
4회	1032.15	468.59	45.4
5회	1078.75	457.04	42.4
6회	1173.82	506.23	43.1

3.2 변전소 회생에너지 측정

변전소의 소비전력량 측정 위치는 그림 6의 점선으

로 표시한 지점으로서 가선전압 1개소, 정류기 2차측 3개소, Feeder 4개소를 측정하였다.

- 측정구간 : 낙성대 및 선릉 변전소
- 측정기간 : 2005년 12월 22일, 2007년 2월 4일
- 측정구간 : 판암, 대동변전소
- 측정기간 : 2009년 4월 15일 07:49 - 09:15
- 측정기간 : 2009년 4월 18일 07:12 - 08:40

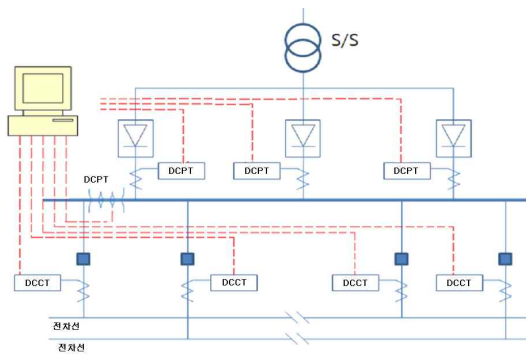


그림 6. 변전소 소비전력량 측정 위치
Fig. 6. Measuring point of substation

변전소 회생에너지 측정결과를 표 2에 보인다. 측정된 데이터를 통해 변전소에서 활용할 수 있는 회생에너지는 전동차 소비에너지의 22~30[%]임을 알 수 있다. 전동차에서 발생하는 회생에너지가 전동차 소비에너지의 42~46[%]이므로 주변 전동차에서 사용되는 회생에너지는 10~20[%]가 된다.

표 2. 변전소 회생에너지 측정결과
Table 2. Measurement results of Naksungdae substation

날 짜	소비전력량 [kWh/일]	회생전력량 [kWh/일]	회생율 [%]
2005.12.22	29,726	-6,655	22.4
2007.02.04	25,400	-6,340	25.0
2009.04.15	242.2	-74.4	30.7
2009.04.18	701.7	-170.3	24.3

4. 에너지절감량 분석

서울메트로 직류 구간인 2, 3, 4호선을 대상으로 회

생에너지 저장장치 설치하는 경우 주중 및 주말 운행 시격별 전력시뮬레이션을 수행한다. 초과제어 전동차와 VVVF 인버터제어 전동차의 회생에너지 발생량이 차이가 나는데, 현재 초과제어 전동차는 서울 2호선 79편성 중 45편성, 3호선 65편성 중 15편성이 운행 중에 있다. 또한 VVVF 인버터제어 전동차는 건인에너지에 비해 회생에너지가 약 45[%]이고 초과제어 전동차는 약 25[%]정도이므로 시뮬레이션에서는 이를 고려하여 시뮬레이션 하였다. 시뮬레이션에 사용된 소프트웨어는 프로그램심의조정위원회에 등록된 프로그램을 적용하였다[13-14].

4.1 서울메트로 2호선

전력시뮬레이션을 위한 입력조건은 다음과 같다.

- 노선 : 서울메트로 2호선
- 차량편성 : 10량 1편성
- 변전소 : 13개 변전소
- 운전 시격
 - 평일 : 첨두시(2분 30초), 비첨두시(5분 30초)
 - 토요일 및 공휴일 : 5분 30초
- 선로 데이터
 - 곡선

표 3. 서울메트로 2호선 곡선 데이터
Table 3. Curve data of Seoulmetro line 2

시작 [m]	끝 [m]	곡선 [m]	시작 [m]	끝 [m]	곡선 [m]	시작 [m]	끝 [m]	곡선 [m]
0	250	250	17,984	18,047	350	36,926	37,177	300
645	682	1,500	18,156	18,213	900	37,531	37,939	250
2,125	2,343	500	18,225	18,271	900	38,198	38,526	400
~	~	~	~	~	~	~	~	~
17,229	17,333	1,200	35,898	36,066	1,000	48,347	48,383	1,000
17,573	17,703	1,200	36,097	36,265	500	48,449	48,630	1,000
17,822	17,952	800	36,316	36,698	700	48,651	48,885	400

- 구배

표 4. 서울메트로 2호선 구배 데이터
Table 4. Gradient data of Seoulmetro line 2

시작 [m]	끝 [m]	구배 [%]	시작 [m]	끝 [m]	구배 [%]	시작 [m]	끝 [m]	구배 [%]
0	108	22	16,720	16,940	-15	29,731	29,930	-2
108	508	4	16,940	17,460	-2	29,930	30,232	-16
508	842	2	17,460	17,645	-28	30,232	31,044	-2
~	~	~	~	~	~	~	~	~
15600	15,900	-2	28,619	29,000	-14	46,945	47,456	22
15900	16,300	-4	29,000	29,270	-27	47,456	47,730	-7
16300	16,720	8	29,270	29,731	-5	47,730	48,229	-32

표 5. 첨두시 사용에너지 및 절감 에너지
Table 5. Consumed energy(w, w/o ESS) and regenerative energy per hour for each substation in Seoul line 2 at rush hour

변전소명	공급에너지 ESS 무 ([kWh])	공급에너지 ESS 유 ([kWh])	절감에너지 ([kWh])
을지로입구	3,021.362	2,500.143	521.219
상왕십리	3,582.773	3,303.885	278.888
성수	3,261.874	3,219.510	42.364
강변	2,981.992	2,981.182	0.810
잠실	3,546.277	3,176.300	369.977
선릉	4,075.788	3,735.083	340.705
서초	4,041.106	3,781.310	259.796
낙성대	3,663.107	3,478.897	184.210
신림	3,250.968	3,094.940	156.028
대림	3,232.595	3,092.578	140.017
영등포구청	3,110.685	3,037.761	72.924
합정	3,338.495	3,084.341	254.154
이대	4,129.288	4,010.036	119.252
합계	45,236.31	42,495.966	2,740.344

2호선의 지선을 제외한 본선의 13개 변전소에 회생 에너지 저장장치를 설치한 것으로 시뮬레이션하였다. 전력시뮬레이션은 첨두시 및 비첨두시에 따라 1시간 시뮬레이션을 수행한다. 그리고 첨두시 운행시간 및 비첨두시 운행시간을 고려하여 1일 사용에너지 및 절감에너지를 계산한다. 1일 계산된 값을 통해 1년 사용

에너지 및 절감에너지를 최종적으로 도출한다. 단, 전력요금은 90[원/kWh]으로 산정하였다.

표 6. 비첨두시 사용에너지 및 절감 에너지
Table 6. Consumed energy(w, w/o ESS) and regenerative energy per hour for each substation in Seoul line 2 at non-rush hour

변전소명	공급에너지 ESS 무 ([kWh])	공급에너지 ESS 유 ([kWh])	절감에너지 ([kWh])
을지로입구	1,806.705	1,308.291	498.414
상왕십리	2,346.039	1,608.558	737.481
성수	2,168.473	1,571.686	596.787
강변	1,833.735	1,473.821	359.914
잠실	1,894.840	1,665.640	229.200
선릉	2,245.160	1,878.429	366.731
서초	2,162.970	1,896.862	266.108
낙성대	1,943.356	1,749.050	194.306
신림	1,765.382	1,554.660	210.722
대림	1,868.891	1,523.390	345.501
영등포구청	1,807.453	1,503.872	303.581
합정	1,812.761	1,615.967	196.794
이대	2,360.249	1,995.313	364.936
합계	26,016.014	21,345.539	4,670.475

표 5, 6은 첨두시 및 비첨두시 회생에너지 저장장치 유·무에 따른 변전소 공급에너지 및 절감에너지를 나타낸다. 표 7, 8은 2호선 13개 변전소 1년 총 사용 및 절감에너지 시뮬레이션 결과를 나타낸다.

표 7. 1년 사용에너지 시뮬레이션 결과
Table 7. Consumed energy per year in terms of 13 S/S in Seoul line 2

구분	1시간 사용에너지 ([kWh])	운영시간	1일 사용에너지 ([kWh])	일수	1년 사용에너지 ([kWh])	1년 사용액 (원)
평일	첨두	4	180,945.24	261	149,079,402	13,417,146,180
	비첨두	15	390,240.21			
주말(토,일)	26,016.014	19	494,304.27	104	51,407,644	4,626,687,960
계					200,487,046	18,043,834,140

표 8. 1년 절감에너지 시뮬레이션 결과
Table 8. Regenerative energy per year in terms of 13 substations in Seoul line 2

구분	1시간 회생에너지 ([kWh])	운영 시간	1일 회생에너지 ([kWh])	일 수	1년 절감에너지 ([kWh])	1년 절감액 (원)
평일	침두 2,740,344	4	10,961.38	261	21,145,829	1,903,124,610
일	비침두 4,670,475	15	70,057.13			
주말(토,일)	4,670,475	19	88,739.03	104	9,228,859	830,597,310
계					30,374,688	2,733,721,920

전력시뮬레이션 결과, 서울메트로 13개 변전소에 대한 1년 사용 에너지는 200,487,046[kWh], 절감 에너지는 30,374,688[kWh]로서 1년 동안 약 27.3억원을 절약할 수 있다. 또한 회생에너지 저장장치를 대당 8억원으로 가정할 때 13개 변전소 설치비용은 104억원이 되고 투자비 대비 회수기간은 3.8년이 된다.

표 9. 1년 절감액(2호선)
Table 9. Reduction cost per year in Seoul line 2

구분	1년 사용 에너지 ([kWh])	1년 절감 에너지 ([kWh])	1년 절감액 (원)
평일	149,079,402	21,145,829	1,903,124,610
주말	51,407,644	9,228,859	830,597,310
계	200,487,046	30,374,688	2,733,721,920

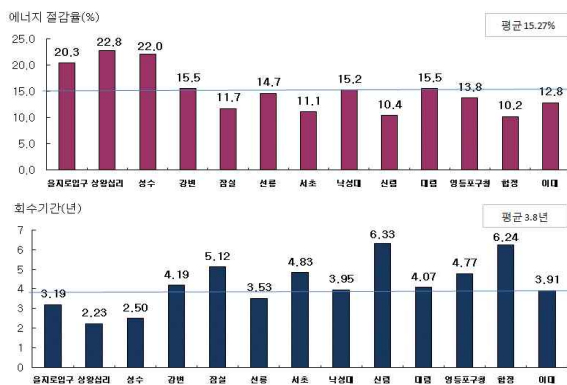


그림 7. 변전소별 에너지 절감률 및 설치 투자대비 회수 기간 (2호선)

Fig. 7. Regenerative rate and payback period for each substation in Seoul line 2

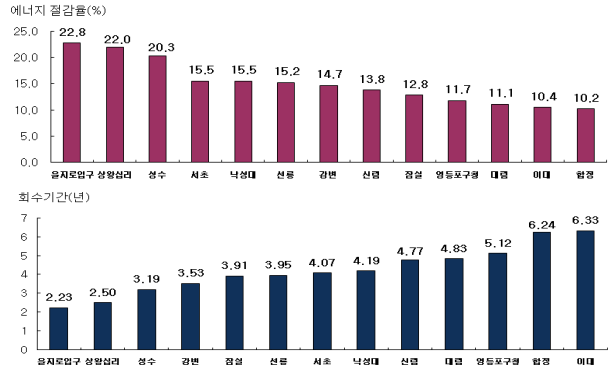


그림 8. 회생에너지 저장장치 도입에 따른 우선 순위
Fig. 8. Priority order to the introduction of ESS

2호선 13개 변전소에 대하여 각 변전소별 에너지 절감률 및 설치 투자대비 회수 기간을 검토하였다. 그림 7과 같이 2호선 평균 에너지 절감률은 15.27[%]이고 투자대비 회수기간은 최소 2.23년에서 최대 6.33년까지 나타났다.

회생에너지 저장장치를 운영기관 도입시 설치 우선순위를 결정할 필요가 있다. 따라서 그림 8과 같이 에너지 절감률이 높은 순서와 투자비 회수기간이 짧은 순서로 재정렬하였다. 상왕십리 변전소가 에너지절감율 22.8[%]로 높고 투자비 회수기간은 2.23년으로 가장 짧아서 상왕십리 변전소부터 설치해야 할 것이다. 그림 8에서 에너지 절감률의 순서와 투자비 회수기간의 순서가 약간 다르게 나타나는데, 회생에너지 저장장치의 설치 우선순위를 정하고자 할 때는 경제성이 우선이므로 에너지 절감률이 아닌 투자비 회수기간으로 고려해야 할 것이다.

4.2 서울메트로 3호선

서울메트로 3호선에 대해서도 회생에너지 저장장치 설치시 에너지 절감률 및 설치 투자비 회수기간에 대해서 시뮬레이션 하였다. 전력시뮬레이션을 위한 입력조건은 다음과 같다.

- 노선 : 서울메트로 3호선
- 차량편성 : 10량 1편성
- 변전소 : 8개 변전소
- 운전 시격
 - 평일 : 침두시(3분), 비침두시(6분 30초)

- 토요일 및 공휴일 : 6분 30초

3호선 8개 변전소에 대하여 각 변전소별 에너지 절감율 및 설치 투자대비 회수기간을 분석하였다. 표 10과 같이 1년 사용 에너지는 90,495,088[kWh], 절감 에너지는 18,558,693[kWh]로서 1년 동안 약 16.7억원을 절감할 수 있다. 또한 회생에너지 저장장치를 대당 8억원으로 가정할 때 8개 변전소 설치비용은 64억원이 되고 투자비 대비 회수기간은 3.83년이 된다.

표 10. 1년 절감액(3호선)
Table 10. Reduction cost per year in Seoul line 3

구분	1년 사용 에너지 ([kWh])	1년 절감 에너지 ([kWh])	1년 절감액 (원)
평일	68,101,361	13,576,179	1,221,856,110
주말	22,393,727	4,982,514	448,426,260
계	90,495,088	18,558,693	1,670,282,370

3호선 8개 변전소에 대하여 에너지 절감율은 평균 20.87[%]였으며 설치 투자대비 회수 기간은 최소 2.83년에서 최대 4.6년으로 나타났다. 3호선도 마찬가지로 회생에너지 저장장치의 설치 우선순위를 투자비 회수 기간으로 고려하면 화물터미널, 약수, 연신내 변전소 순서가 되어야 할 것이다.

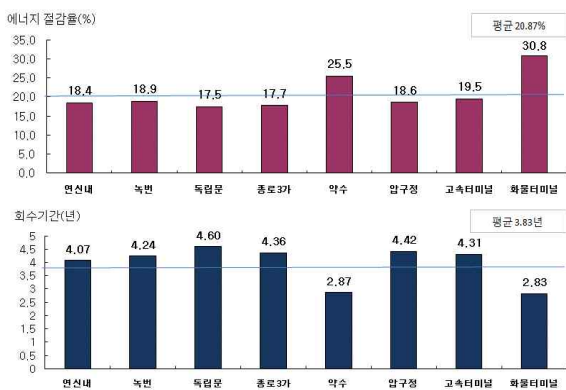


그림 9. 변전소별 에너지 절감율 및 설치 투자대비 회수 기간(3호선)

Fig. 9. Regenerative rate and payback period for each substation in Seoul line 3

4.3 서울메트로 4호선

서울메트로 4호선에 대해서도 회생에너지 저장장치 설치시 에너지 절감율 및 설치 투자비 회수기간에 대해서 시뮬레이션 하였다. 전력시뮬레이션을 위한 입력조건은 다음과 같다.

- 노선 : 서울메트로 4호선
- 차량편성 : 10량 1편성
- 변전소 : 9개 변전소
- 운전 시격
 - 평일 : 침두시(2분 30초), 비침두시(5분 30초)
 - 토요일 및 공휴일 : 5분 30초

4호선 9개 변전소에 대하여 각 변전소별 에너지 절감율 및 설치 투자대비 회수기간을 분석한 결과, 표 11과 같이 4호선 9개 변전소에 대한 1년 사용 에너지는 129,484,074[kWh], 절감 에너지는 18,983,443[kWh]로서 1년 동안 약 17.1억원을 절감할 수 있다. 또한 회생에너지 저장장치를 대당 8억원으로 가정할 때 9개 변전소 설치비용은 72억원이 되고 투자비 대비 회수기간은 4.21년이 된다.

표 11. 1년 절감액(4호선)
Table 11. Reduction cost per year in Seoul line 4

구분	1년 사용 에너지 ([kWh])	1년 절감 에너지 ([kWh])	1년 절감액 (원)
평일	97,189,830	13,541,501	1,218,735,090
주말	32,294,244	5,441,942	489,774,780
계	129,484,074	18,983,443	1,708,509,870

성신여대 변전소는 투자비 회수기간이 8.53년으로 나타났다는데, 이는 이 구간에 전동차 회생량이 적게 발생하여 회수기간이 길어진 것이므로 회생에너지 저장장치의 설치용량을 적게해서 가격을 낮춰 설치해야 할 것이다.

4호선 9개 변전소에 대하여 절감률을 분석하였다. 그 결과 평균 14.85[%]였으며, 설치 투자대비 회수 기간은 최소 2.09년에서 최대 8.53년으로 나타났다. 4호선도 마찬가지로 회생에너지 저장장치의 설치 우선순

위를 투자비 회수기간으로 고려하면 총신대입구, 창동, 이촌 변전소 순서가 되어야 할 것이다.

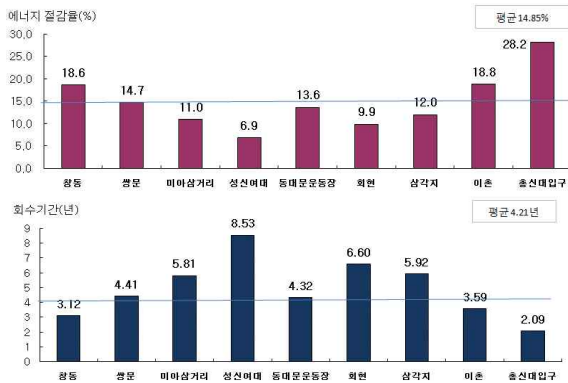


그림 10. 변전소별 에너지 절감률 및 설치 투자대비 회수 기간(4호선)
 Fig. 10. Regenerative rate and payback period for each substation in Seoul line 4

서울메트로 2, 3, 4호선 전체에 대한 회생에너지 저장장치 도입시 평균 에너지절감율은 16[%]이며, 설치 투자비 회수기간은 약 4년으로 나타났다.

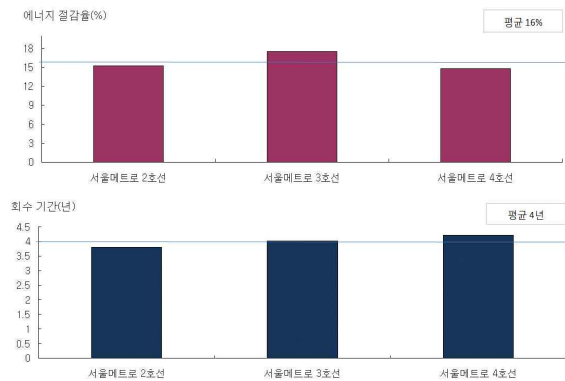


그림 11. 에너지 절감률 및 설치 투자비 회수기간 (서울메트로 2,3,4호선)
 Fig. 11. Regenerative rate and payback period in Seoul line 2, 3 and 4

회생에너지 저장장치의 저장매체로 사용될 슈퍼캐패시터의 유지보수 기간은 이론적으로는 반영구적이지만 실제적으로는 10~15년 정도로 고려되고 있다[15]. 따라서 10년을 고려할 때 도시철도 운영기관은 약 6년 정도는 이익을 낼 수 있는 기간이라고 판단된다.

5. CO₂ 절감량 분석

회생에너지 저장장치는 전동차 운행에 필요한 전기를 절약할 수 있어 운영기관의 에너지 사용량을 줄일 수 있을 뿐만 아니라 지구 온난화 주범인 CO₂ 배출 삭감에 기여할 수 있다. 서울 2호선 노선에 대하여 회생에너지 저장장치에 의해 줄어드는 CO₂배출 절감량은 연간 12,879톤으로 금액은 약 6억원에 해당된다.

표 12. CO₂ 배출 절감량(서울메트로 2호선 13개소)
 Table 12. Reduction of CO₂ for each substation in seoul line 2

구분	1년 절감 에너지 ([kWh/년])	1년 CO ₂ 배출 절감량 (t/년)	1년 CO ₂ 배출 절감비 (억원/년)
평일	21,145,829	12,879톤	6.03억원
주말	9,228,859		
계	30,374,688		

우리나라 CO₂ 배출량 계수는 0.424([kg/kWh])이다. 유럽의 탄소배출권 가격을 26[유로/ton]로 형성되어 있으며 점점 그 금액은 상승하고 있다. 1유로를 1,800원으로 가정할 경우 서울메트로 2호선 탄소배출 절감 금액은 표 12와 같이 약 6.03억원이고 Table 9에서 분석된 연간 에너지 절감비는 27.34억원이므로 국가적으로는 연간 33.37억원을 절감할 수 있을 것이다. 또한, 서울메트로 2, 3, 4호선에 대한 연간 CO₂ 배출 절감량, 절감금액 및 에너지 절감비는 표 13과 같다.

서울메트로에 회생에너지 저장장치 도입시 에너지 절감비는 61.13억원/년이고 CO₂배출 절감비는 13.48억원/년으로 나타났다. 따라서 회생에너지 저장장치 도입에 의해 총 74.61억원을 절감할 수 있을 것으로 예상된다.

6. 전국 도시철도 회생에너지 저장장치 적용분석

본 절에서는 각 도시철도 운영기관별 주요 12개 노선에 대하여 회생에너지 저장장치 적용시 에너지 절

감율, 투자비 회수기간, CO₂ 절감량을 분석 하였다. 전국 도시철도 전력시물레이션을 위한 입력조건은 다음과 같다.

표 13. 연간 CO₂ 배출절감량, 절감금액 및 에너지 절감비(서울메트로 2,3,4호선)

Table 13. Regenerative energy, reduction of CO₂ and reduced cost per year in Seoul line 2, 3 and 4

노선	2호선	3호선	4호선
1년 절감 에너지 (kWh/년)	30,374,688	18,558,693	18,983,443
CO ₂ 배출 절감량(t/년)	12,879	7,869	8,049
CO ₂ 배출 절감비 (억원/년)	6.03	3.68	3.77
에너지 절감비 (억원/년)	27.34	16.7	17.09
총계	33.37	20.38	20.86

표 14. 시물레이션 입력조건(전국 주요 12개 노선)

Table 14. Input data of simulation

노선	편 성	운행시격		변전소 개수
		첨두시	비첨두시	
서울2	10량 1편성	2.5분	5.5분	13
서울3	10량 1편성	3분	6.5분	8
서울4	10량 1편성	2.5분	5.5분	9
서울5	8량 1편성	3분	6분	15
서울6	8량 1편성	3분	6분	12
서울7	8량 1편성	3분	6분	16
서울8	6량 1편성	4분	8분	4
광주1	4량 1편성	5분	10분	4
인천1	8량 1편성	5분	8.5분	8
부산3	4량 1편성	5분	7분	6
대전1	4량 1편성	5분	10분	7
대구2	6량 1편성	5분	7분	9

시물레이션 결과 그림 12와 같이 전국 도시철도에 대해 평균 에너지 절감률은 25[%]이며 설치 투자비 회수기간은 평균 3.77년으로 나타나 충분한 경제성이

있음을 확인하였다.

서울메트로는 운행시격이 타 기관보다 상대적으로 짧아 평균 16[%]의 에너지 절감률로 나타났다. 전국 평균보다 9[%]나 적었지만 투자비 회수기간은 평균 4년으로 전국 평균과 비슷하게 나타났다.

표 14와 그림 12를 분석해 보면 전동차 편성수와 운행시격이 에너지 절감률 및 투자비 회수기간과 연관 관계가 있음을 알 수 있다. 서울메트로 전동차 편성이 10량으로 구성되어 4~8량으로 구성된 전동차 보다는 발생하는 회생에너지의 절대치가 크기 때문에 설치투자비 회수기간은 타 운영기관과 유사하게 나타났다.

동일 운행시격인 4량 1편성의 부산 3호선과 6량 1편성의 대구 2호선을 비교해 보면 부산 3호선의 에너지 절감률은 29.11[%]이고 대구 2호선은 27.3[%]로서 대구 2호선의 에너지 절감률이 낮게 나타났다. 하지만 투자비 회수기간은 오히려 짧게 나타났다.

동일 편성인 서울 5~7호선과 인천 1호선의 경우, 운행시격에 따라 에너지 절감률은 차이가 클 수 있지만 투자비 회수기간은 비슷하게 나타났다.

따라서 운행시격은 에너지절감률과 관계가 있고, 전동차 편성차량수는 투자비 회수기간과 관계가 깊음을 검증하였다.

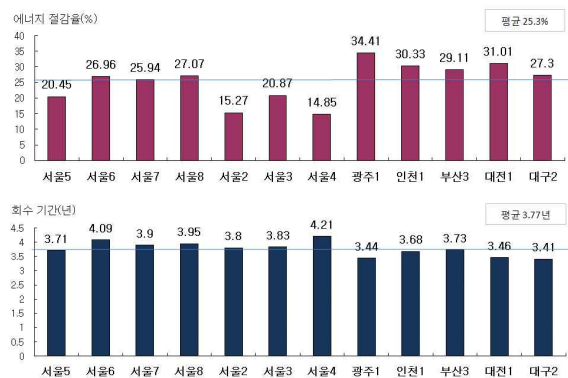


그림 12. 에너지 절감률 및 설치 투자비 회수기간 (전국 주요 12개 노선)

Fig. 12. Regenerative rate and payback period

위 표 14와 그림 12의 결과를 통해, 우리나라 운행시격별 에너지 절감률을 일반화 해보면 표 15와 같이 나타낼 수 있다.

표 15. 운행시격별 에너지 절감률
Table 15. Saving rate by headway

운행시격		에너지 절감률
침두시	비침두시	
2.5분	5.5분	15[%]
3분	6분	20~26[%]
4분	8분	27[%]
5분	7 또는 8분	27~30[%]
5분	10분	31~34[%]

에너지 및 CO₂ 절감량은 그림 13~15와 같이 분석되었다. 각 노선별 연간 에너지 절감량 총합은 2.37억 [kWh]로 213.42억원 절감할 수 있으며, 연간 47.05억원의 탄소배출량을 절감하는 효과가 있을 것으로 분석되었다. 따라서 연간 약 260.47억원의 효과가 있을 것이며, 저장매체의 내용연수를 10년으로 본다면 2,605억원의 경제적 효과가 있을 것이다.

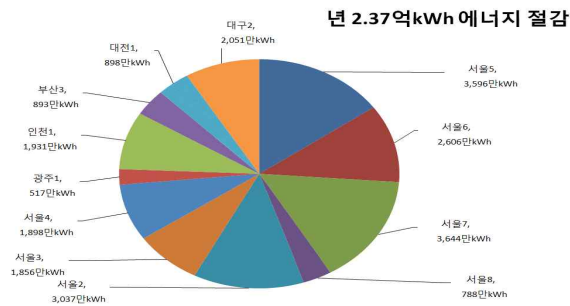


그림 13. 연간 에너지 절감량
Fig. 13. Regenerative energy per year for 12 lines in Korea

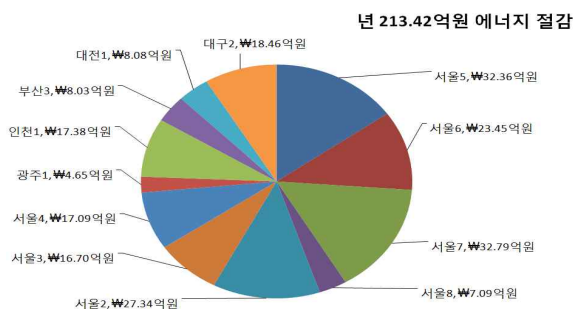


그림 14. 연간 에너지 절감비용
Fig. 14. Reduction cost of energy per year for 12 lines in Korea

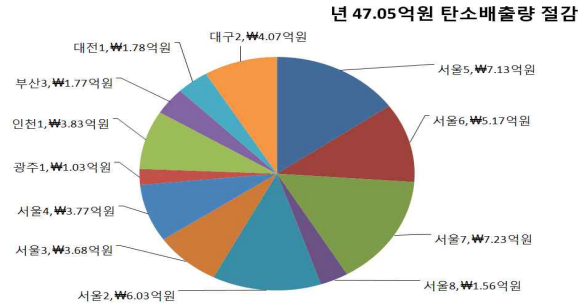


그림 15. 연간 탄소배출량 절감량
Fig. 15. Reduction of CO₂ per year for 12 lines in Korea

7. 결론

본 논문의 시뮬레이션을 통해 회생에너지 저장장치의 설치 우선순위를 정하고자 할 때는 경제성이 우선이므로 에너지 절감률이 아닌 투자비 회수기간으로 고려해야 할 것이다. 또한 시뮬레이션을 통해 운행시격은 에너지절감률과 관계가 있고, 전동차 편성 차량수는 투자비 회수기간과 관계가 있음을 분석하였다.

도시철도 운영기관 주요 노선에 회생에너지 저장장치 적용시 에너지 절감률은 평균 25[%]가 될 것이며 설치 투자비 회수기간은 평균 3.77년으로 나타났다. 그리고 각 노선별 연간 에너지 절감량 총합은 2.37억 [kWh]로 213.42억원 절감할 수 있으며, 연간 47.05억원의 탄소배출량을 절감하는 효과가 있을 것으로 분석되었다. 따라서 연간 약 260.47억원의 효과가 있을 것이며, 저장매체의 내용연수를 10년으로 본다면 2,605억원의 경제적 효과가 있을 것이다.

따라서 회생에너지 저장장치 도입은 운영기관으로서 경영개선 뿐만 아니라 국가적으로 탄소량 절감 등 녹색성장에 기여할 것으로 기대된다.

References

- [1] 우진산전, “에너지저장시스템 기술개발 1차년도 보고서”, 2006.
- [2] 우진산전, “에너지저장시스템 기술개발 2차년도 보고서”, 2007.
- [3] 우진산전, “에너지저장시스템 기술개발 5차년도 보고서”, 2009.
- [4] 이한민, 김길동, 이장무, “도시철도시스템을 위한 전기이

중층 커패시터 적용에 관한 연구”, 대한전자공학회 하계 학술대회 논문집, 제29권 제1호, pp. 901-902, 2006.

[5] 김길동, 이한민, “전동차 회생에너지 활용을 위한 저장시스템 기술”, 한국조명·전기설비학회 특집/차세대 전동차 시스템 기술동향, Vol.20, No.2, pp. 10-15, 2006.

[6] 녹색위, “2020년 국가온실가스 감축목표 30(%) (배출전망치 대비) 제안”, SBS, 2009.

[7] 안천현, 이한민, 김길동, 이희성, “에너지저장시스템 적용에 의한 에너지절감 효과에 관한 연구, 한국철도학회 논문집 제12권 제4호, pp. 582~589, 2009.

[8] 안천현, 이한민, 김길동, 이희성, “에너지저장시스템의 서울메트로 2호선 적용 효과에 관한 연구, 한국철도학회 춘계학술대회 논문집, pp. 966~971, 2009.

[9] 안천현, 이한민, 김길동, 이희성 “에너지저장시스템 설치 우선순위에 관한 연구, 한국철도학회 춘계학술대회 논문집, pp. 2361~2366, 2009.

[10] 김길동, 이한민, 오세찬, “도시철도 회생 에너지저장시스템 설치 및 시험”, 대한전기학회 전력계통연구회 춘계학술대회 논문집, pp. 172-174, 2008.

[11] Hanmin Lee, Gildong Kim, Changmu Lee, “Development of ESS for Regenerative Energy of Electric Vehicle”, WCRR, pp. 476-478, 2008.

[12] Hanmin Lee, Gildong Kim, Changmu Lee(2007), “Analysis for EDLC Application on Electric Railway System”, PCC nagoya, pp. 226-229, 2007.

[13] 프로그램등록증, “KRR TPS”, 2008-01-121-005303, 2008.

[14] 프로그램등록증, “다중열차의 회생에너지 분석을 위한 DC급전 시뮬레이터” 2001-01-12-9422, 2008.

[15] 우진산전, “에너지저장시스템 기술개발 3차년도 보고서”, 2008.

◆ 저자소개 ◆



김철섭(金哲燮)

1966년 4월 6일생. 1994년 부경대학교 전기공학과 졸업. 2002년 한남대학교 경영산업대학원 경영공학과정 기술품질경영과 졸업(석사). 현재 한국철도공사 광역철도본부 차량운용부장.

E-mail : kimcsub@korail.com



안천현(洪吉東)

1950년 4월 28일생. 1990년 한국방송통신대학교 초등교육과 졸업. 1993년 고려대학교 산업대학원 전기공학과 졸업(석사). 2010년 서울산업대학교 철도전문대학원 철도차량시스템공학과 졸업(박사). 현재 (주) 선진엔지니어링 철도시스템부

부사장.

E-mail : ancheon@nate.com



이병승(李炳承)

1960년 6월 13일생. 1988년 서울산업대학교 공과대학 전기공학과 졸업. 1991년 중앙대학교 공과대학 전기공학과 졸업(석사). 1995년 동 대학원 전기공학과 졸업(박사). 현재 한국철도기술연구원 주행추진연구실 책임 연구원.

E-mail : bslee@krri.re.kr



이희성(洪吉東)

1957년 2월 19일생. 1981년 한양대학교 기계공업과 졸업. 1983년 서울대학교 대학원 기계설계학과 졸업(석사). 1991년 미국 Georgia Institute of Technology 졸업(박사). 현재 서울과학기술대학교 철도전문대학원 철도차량시스템공학과

교수.

E-mail : hslee@snut.ac.kr