

## 에너지저장시스템 적용에 의한 에너지절감 효과에 관한 연구 A Study on Effects of Energy Saving by Applying Energy Storage System

안천연<sup>†</sup> · 이한민\* · 김길동\*\* · 이희성\*\*\*

Cheon Heon An · Han Min Lee · Gil Dong Kim · Hi Sung Lee

**Abstract** The energy generated by braking vehicle would simply be converted into waste heat by its braking resistors if no other vehicle is accelerating at exactly the same time. Up to 45% of the tractive power of vehicles capable of returning energy to the power supply can be regenerated during braking and that this energy can be used to feed vehicles which are accelerating at the same time. Such synchronized braking and accelerating can not be coordinated, the ESS(energy storage system, here after) stores the energy generated during braking and discharges it again when a vehicle accelerates. The ESS is able to store and discharge energy extremely quickly, consequently enabling 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. The energy saving rate is related to the headway. If the headway is long/short, the energy saving goes up/down. When the headway is short, the ESS can not save much regenerative energy. The headway of SeoulMetro line 2 as the worst case is very short in Korea urban transit system. So, the energy saving rate will be very low. If the ESSs are applied to another railway system, we can expect that the effectiveness is better than the results of SeoulMetro line 2. This paper presents effects of energy saving obtained by applying the ESS to SeoulMetro line 2.

**Keywords** : Energy storage system, Regenerative energy, Energy saving

**요 지** 회생에너지는 회생 전동차와 역행 전동차의 순간적인 오버랩 경우를 제외하고, 전동차내 저항기 또는 전차선의 저항에 의해 열로서 사라지게 된다. 에너지저장시스템은 전동차 제동시 발생되어 재활용되지 못하고 사라지는 회생 에너지를 에너지저장시스템에 저장하고 전동차가 역행할 때 에너지저장시스템으로부터 에너지를 공급하여 도시철도시스템에서 회생 에너지를 재활용하는 시스템이다. 동시에 역행과 제동하는 차량이 존재하지 않을 지라도 차량간 에너지의 완전한 교환이 이루어 질 수 있다. 따라서 에너지저장시스템은 에너지를 저장하고 재활용함으로써 에너지를 절감할 수 있는 유용한 장치이다. 에너지저장시스템은 운행시격과 관계가 깊은데, 운행 시격이 짧은 경우보다 큰 경우 전동차 회생시 회생 에너지가 모두 에너지저장시스템으로 저장되므로 저장된 에너지를 활용할 수 있어 도시철도 운영기관의 에너지 절감율이 높아지게 된다. 반대로 운행 시격이 짧은 경우 한 번전소 구간 내에 전동차 여러 편성이 있을 수 있다. 이때 하나의 전동차 회생시 이 회생 에너지가 주변의 역행 전동차에 공급되던 에너지저장시스템으로 들어오는 회생 에너지는 적을 것이다. 따라서 본 논문은 에너지저장시스템을 적용하는데 있어서 악조건인 운행 시격이 국내에서 가장 짧은 서울메트로 2호선을 대상으로 에너지저장시스템 적용 효과를 에너지절감 측면에서 현장 실측과 시뮬레이션을 통해 분석하고자 한다.

**주 요 어** : 에너지저장시스템, 회생 에너지, 에너지 절감

<sup>†</sup> 책임저자 : 정회원, 한신공영 SE팀 총괄팀장  
E-mail : ancheon@nate.com

TEL : (032)765-4045 FAX : (032)765-4039

\* 정회원, 한국철도기술연구원, 차세대전동차연구단

\*\* 정회원, 한국철도기술연구원, 차세대전동차연구단

\*\*\* 교신저자 : 정회원, 서울산업대학교 철도차량시스템공학과 교수

## 1. 서론

한국의 도시철도시스템에서는 7000량 이상 전동차가 운행되고 있으며, 95%가 회생 에너지를 만들어 낸다. 지하철에서 운행하는 전동차는 제동시 발전기가 되어 전기에너지를 만들게 되는데 이 에너지를 회생 에너지라고 한다. 전동차 역행시 소비에너지의 약 45%가 회생 에너지이다. 즉, 전동차가 사용한 에너지의 45%를 발전기처럼 만들어 공급할 수 있다는 것이다[1,2].

직류 도시철도의 변전소는 순방향 다이오드 방식이며 전동차는 변동부하인 동시에 이동 부하인 것이 특징이다. 직류 도시철도의 전압 공급방식은 한전에서 공급받은 AC전압을 정류기를 통해 정류하고 DC전압으로 변환하여 공급하는 방식으로, 정류기는 순방향 다이오드 방식으로 회로가 연결되어 있어 전동차의 회생전력은 전원측으로 반환되지 않는 구조이며, 전동차의 회생 에너지를 전차선에 그대로 되돌리는 경우, 회생시 순간적으로 발생된 에너지가 전차선전압을 상승시켜 시스템을 불안정하게 할 뿐만 아니라, 차량 고장의 원인이 되고 있다. 또한 주변 전동차가 그 전압을 수용하지 못할 경우 발생된 회생에너지는 전차선의 저항에 의해 열에너지로 전환되어 낭비된다[3].

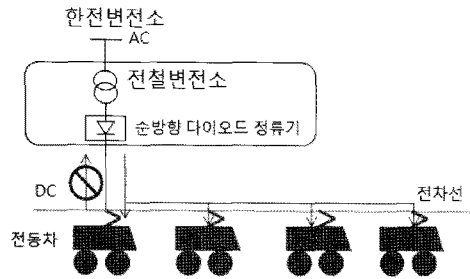


Fig. 1. General electric railway system

현재 이 회생 에너지는 주변에 있는 역행 전동차에 공급되어 사용되고 있다. 이렇게 역행 전동차와 회생 전동차의 오버랩인 경우 재활용되는데 이런 오버랩이 완벽하게 된다면 에너지 재활용이 최적 조건이 되어 재활용율은 100%가 될 것이다. 그러나 실제적으로 이러한 현상이 일어나지 못하고 있다는 것이 현실이다. 따라서 회생에너지는 회생 전동차와 역행 전동차의 순간적인 오버랩 경우를 제외하고, 전동차내 저항기 또는 전차선의 저항에 의해 열로서 사라지게 된다. 즉, 현재 소비에너지의 45% 회생 에너지 중 주변 전동차에 소비에너지의 10~15% 정도만 활용이 되고 있고 25~30%는 전차선에서 열로 사라진다는 것이다.

에너지저장시스템은 전동차 제동시 발생된 회생 에너지

를 에너지저장시스템에 저장하고 전동차가 역행할 때 전차선 전압이 떨어지게 되면 에너지저장시스템으로부터 에너지를 방전한다. 따라서 에너지저장시스템은 도시철도시스템에서 회생에너지의 재활용을 위한 최적 조건을 만든다. 결과적으로 동시에 역행과 제동하는 차량이 존재하지 않을 지라도 차량 간 에너지의 완전한 교환이 이루어질 수 있다. 따라서 에너지저장시스템은 에너지를 저장하고 재활용함으로써 에너지를 절감할 수 있는 유용한 장치이다[4].

에너지저장시스템은 운행노선의 운행 시격과 관계가 깊다. 즉, 운행노선의 운행 시격이 짧을 경우 한 변전소 구간 내에 전동차가 여러 편성 있을 수 있다. 이때 하나의 전동차 회생시 이 회생 에너지가 주변의 역행 전동차에 공급되면 에너지저장시스템으로 들어오는 회생 에너지는 적을 것이다. 반대로 운행 시격이 클 경우 회생 전동차의 회생 에너지가 모두 에너지저장시스템으로 저장되므로 에너지의 재활용율이 높아지게 된다. 따라서 운행시격이 짧은 경우보다 큰 경우 전동차 회생시 회생 에너지가 모두 에너지저장시스템으로 저장되므로 저장된 에너지를 재활용하게 되어 도시철도 운영기관에서는 많은 에너지를 절감할 수 있다. 즉, 운전시격이 짧으면 에너지저장시스템의 에너지절감 효과가 떨어질 것이다. 서울메트로 2호선은 우리나라 7대 도시철도 운영기관 직류시스템 중 가장 운전 시격이 짧은 경우에 해당하므로 에너지저장시스템에 의한 에너지 재활용율은 낮을 것이다. 따라서 에너지저장시스템 적용시 가장 효과가 적을 것으로 예상되는 서울메트로 2호선을 대상으로 그 효과를 분석함으로써 국내 도시철도시스템에 에너지저장시스템 적용시 최소한 서울메트로 2호선 보다는 큰 효과가 있을 것으로 판단할 수 있다.

또한 저탄소 녹색 성장을 위한 에너지 절감 및 지구온난화 방지를 위해 이렇게 낭비되고 있는 회생 에너지를 1%라도 재활용하기 위해서는 에너지저장시스템 적용이 필수적이다. 본 논문은 에너지저장시스템을 전국으로 적용하기 전에 악조건인 운전 시격이 가장 짧은 서울메트로 2호선을 대상으로 에너지저장시스템 적용시 에너지절감 측면에서 어떠한 경제적 효과가 있는지 분석하고자 한다.

## 2. 에너지저장시스템

에너지저장시스템은 직류 도시철도 구간에서 전동차 제동시 발생한 회생에너지를 에너지저장시스템에 저장하고, 저장된 에너지를 전동차 역행시에 전동차에 공급하는 것으로 전동차 운행 중 발생하는 에너지를 재활용하는 시스템이다.

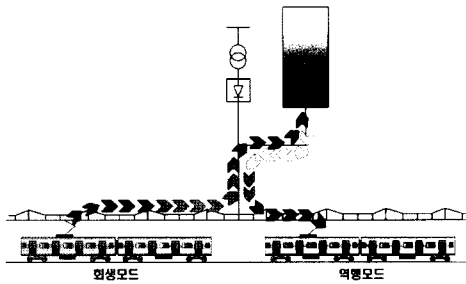


Fig. 2. Charging and discharging regenerative energy

즉, 에너지저장시스템은 변전소의 모선에 연결되어 Fig. 2와 같이 전동차가 회생할 때 전동차에서 발생된 에너지에 의해 전차선 전압이 올라가면 이 에너지가 에너지저장시스템에 저장되고, 전동차가 역행을 하면 전차선 전압이 내려가므로 에너지저장시스템은 이 에너지를 전차선을 통해 전동차에 공급하게 되어 에너지절감이 가능하다[4-6].

에너지저장시스템의 경우 지구온난화에 따라 전 세계적으로 온실가스를 줄이고자 다각적인 노력을 하고 있으며, 교토의정서에 의한 지구 온난화에 따른 대책 강구로서 전기 철도 차량에서의 회생 에너지를 저장하는 에너지 저장기술이 한국(한국철도기술연구원), 독일(지멘스), 일본(철도종합연구소) 등을 중심으로 활발히 연구가 진행되고 있다.

○ 국외현황

일본의 경우 일본 철도종합연구소에서 축소 모델을 제작하여 실험을 진행하였으며, 독일 지멘스의 경우 Cologne의 Bruck(2001), Bochum의 Hattingen(2003), Dresden(2003), 스페인 Madrid의 Sainz de Baranda, Rio Rossas, Ventas(2002), 미국 Portland(2003)에 에너지저장시스템을 설치 시험하였다. Cologne의 경우 연간 500MWh(전체 소비에너지의 27%)를 절감하고 있다.

○ 국내현황

국내는 한국철도기술연구원에서 경산 경량전철 시험선에 에너지저장시스템을 설치하여 한국에너지기술연구원을 통해 동일 구간을 차량이 운행하면서 에너지저장시스템이 동작할 때와 동작하지 않을 때 변전소에서 공급된 전력을 측정하여 20.64%의 에너지 절감량 결과를 얻었다[7].

3. 에너지저장시스템 적용효과 분석

서울메트로 2호선에 에너지저장시스템을 설치하여 경제성을 분석하기 위해서는 전동차 1편성이 해당노선을 운행할 때 매 시간 및 위치마다 측정된 소비전력량과 회생전력

량을 시뮬레이션과 비교·검토되어야 하고, 이 결과를 통해 에너지저장시스템 설치에 따른 주중 및 주말 운행 시격별 전력시뮬레이션이 수행되어야 한다.

3.1 전동차 회생에너지 측정 및 분석[7,8]

서울메트로 2호선 내선구간(신도림에서 시청방향)을 운행하는 전동차를 대상으로 회생에너지를 측정한다. 일반적으로 전동차의 소비되는 전력은 주로 추진 및 보조전원으로 사용된다. 이에 추진제어장치와 보조전원장치에서 동시에 소비전력량을 측정하여 차량 1편성당 소비되는 전력량을 검토 및 분석한다. 전동차 측정 개소를 Fig. 3에서 보여준다.

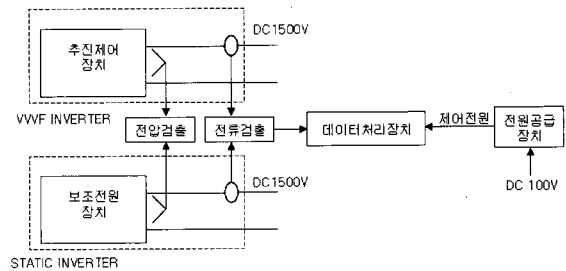


Fig. 3. Measuring points of consumed energy of a vehicle

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

- 측정구간 : 신도림 - 신도림 (내선구간) 3회 순환
- 측정항목 : 가선전압, VVVF 입력전류, SIV 입력전류
- 측정기간 : 2006년 2월 17일 05시 34분~2006년 2월 17일 10시 18분

소비에너지 측정장비는 모니터링 시스템, 전압센서, 전류센서, 전원공급장치로 구분되며, 각 장치의 기본 사양은 다음과 같다.

샘플링 된 데이터는 메모리 카드에 기록하고, 기록된 데이터를 분석한다.

Fig. 4는 회생에너지 측정장치의 제어기 외형 및 내부를 보여준다.

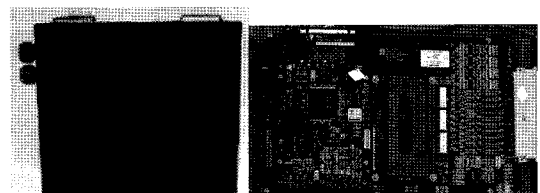


Fig. 4. Equipments for measuring regenerative energy

○ 전압센서

전압센서는 모선의 전압을 DCPT를 사용하여 300 : 1의 변환비로 제어기에 입력한다.

센서 스케일 : 3,000V/10V

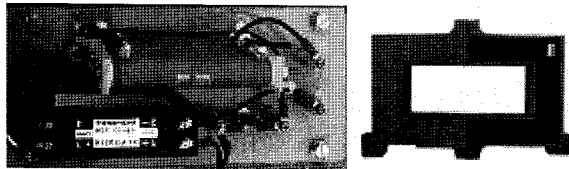
측정 : 모선 전압의 전압 측정

○ 전류센서

전류센서는 정류기 출력 전류 및 각 피더 전류를 측정하기 위하여 300 : 1의 변환비로 한다.

센서 스케일 : 3000A/10A

측정 : 피더의 전류 측정



(a) Voltage sensor (b) Current sensor

Fig. 5. DCPT and DCCT

측정결과 역행전력량은 Table 1과 같이 약 940kWh~1220 kWh이며 회생전력량은 430kWh~566kWh 이다. 또한 전동차 회생 에너지율은 평균 45.8%로 나타났다.

Table 1. Measured regenerative energy of a vehicle

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
평균	1084.63	497.05	45.8

3.2 전동차 회생에너지 시뮬레이션 및 분석

서울메트로 2호선을 대상으로 전동차 성능 시뮬레이션(TPS, Train Performance Simulation)을 수행한다. TPS 입력 데이터로서 전동차, 노선특성 및 역사 위치는 다음 Table 2, 3과 같다.

• 전동차 및 노선 특성

Table 2. Vehicle and line characteristics

구분	특성
차량	10량 편성(5M5T)
공차무게	359ton
전압	DC 1500V
최대속도	80km/h
가속도	3.0km/h/s
감속도	3.5km/h/s
전동기 전력	200kW

• 역위치

Table 3. Station locations

역이름	위치[m]	역이름	위치[m]
을지로입구	0	서초	23178
을지로3가	755	방배	24821
을지로4가	1405	사당	26380
동대문운동	2415	낙성대	28049
신당	3295	서울대입구	29098
상왕십리	4230	봉천	30080
왕십리	5070	신림	31229
한양대	6061	신대방	32998
독점	7145	구로공단	34102
성수	7970	대림	35225
건대입구	9218	신도림	36989
구의	10795	문래	38216
강변	11719	영등포구청	39081
성내	13516	당산	40237
잠실	14557	합정	42260
신천	15773	홍대입구	43340
종합운동장	16953	신촌	44650
삼성	17931	이대	45482
선릉	19257	아현	46400
역삼	20461	충정로	47202
강남	21236	시청	48263
교대	22461		

시뮬레이션 결과 Table 4와 같은 결과를 얻었다.

Table 4. Results of TPS (continued)

구 간	역간 거리 [kWh]	역행 [kWh]	회생 [kWh]	구 간	역간 거리 [kWh]	역행 [kWh]	회생 [kWh]
을지로입구->을지로3가	755	22.7	11.3	교대->서초	717	24.2	7.2
을지로3가->을지로4가	650	19.3	10.6	서초->방배	1643	30.1	15.8
을지로4가->동대문운동	1010	28.2	15.1	방배->사당	1559	34.3	17.1
동대문운동->신당	880	24.2	11.7	사당->낙성대	1669	50.0	11.0
신당->상왕십리	935	27.5	8.5	낙성대->서울대입구	1049	24.2	14.9
상왕십리->왕십리	840	19.7	14.0	서울대입구->봉천	982	25.8	13.9
왕십리->한양대	991	31.9	7.6	봉천->신림	1149	25.5	13.9

Table 4. Results of TPS

구 간	역간 거리	역행 [kWh]	회생 [kWh]	구 간	역간 거리	역행 [kWh]	회생 [kWh]
한양대 ->독섬	1084	26.2	11.4	신림->신대방	1769	39.5	11.2
독섬 ->성수	825	24.2	12.6	신대방 ->구로공단	1104	25.9	11.9
성수 ->건대입구	1248	31.7	14.4	구로공단 ->대림	1123	22.4	10.7
건대입구 ->구의	1577	40.1	14.6	대림->신도림	1764	34.6	25.3
구의->강변	924	15.5	9.8	신도림->문래	1227	21.3	10.7
강변->성내	1797	32.5	15.1	문래 ->영등포구청	865	23.7	12.6
성내->잠실	1041	18.1	14.4	영등포구청 ->당산	1156	33.8	9.5
잠실->신천	1216	28.0	14.8	당산->합정	2023	35.8	21.1
신천 ->종합운동장	1180	31.5	14.5	합정 ->홍대입구	1080	28.9	14.2
종합운동장 ->삼성	978	26.6	12.6	홍대입구 ->신촌	1310	39.3	15.1
삼성->선릉	1326	31.7	13.6	신촌->이대	832	28.7	5.4
선릉->역삼	1204	38.3	12.1	이대->아현	918	26.8	13.3
역삼->강남	775	13.9	13.6	아현->충정로	802	26.1	8.6
강남->교대	1225	30.8	14.3	충정로->시청	1061	21.7	16.1

시뮬레이션한 Table 4와 측정을 비교한 결과를 Fig. 6, 7에 나타낸다. 실측은 3회 수행되었으며, 운전자의 운전 패턴에 따라 실측인 경우에도 값이 다를 수 있음을 확인하였다. 그러나 전체적인 패턴이 유사함을 알 수 있었다. 따라서 시뮬레이션 결과도 실측의 소비전력량과 회생전력량 패턴과 유사하게 발생하는지를 확인한다. 시뮬레이션 결과, 전동차 실측 결과와 거의 동일한 패턴의 결과를 얻었으며, 회생을 또한 45.9%로 실측과 거의 유사한 결과를 얻었다.

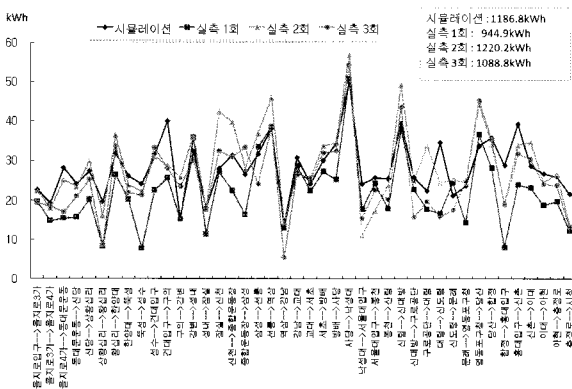


Fig. 6. Powering energy(Measurement & Simulation)

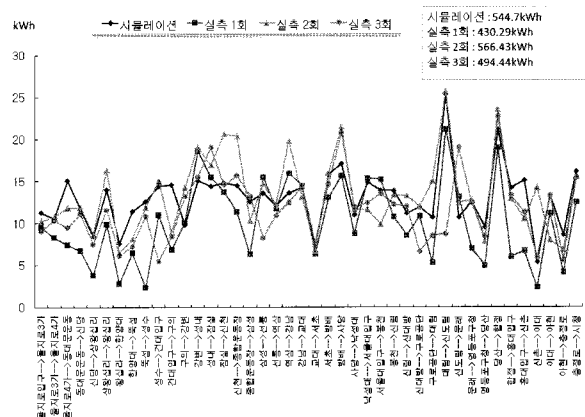


Fig. 7. Regenerative energy(Measurement & Simulation)

### 3.3 변전소 회생에너지 측정에 의한 경제성 분석

변전소에서 소비전력량 및 회생전력량을 측정함으로써 에너지저장시스템 설치 및 운용시 경제성을 검토하고자 한다. 변전소는 서울메트로 2호선 낙성대 변전소를 대상으로 측정한다. 낙성대 변전소의 소비전력량 측정 위치는 Fig. 8의 붉은 색으로 표시한 지점으로서 가선전압 1개소, 정류기 2차측 3개소, Feeder 4개소를 측정하였다[7~9].

- 측정구간 : 낙성대 변전소
- 측정개소 : 정류기 출력전류 (3개소), Feeder 출력전류 (4개소), 가선 전압 (1개소)
- 측정기간 : 2007년 1월 29일 ~ 2007년 2월 5일(6일간)

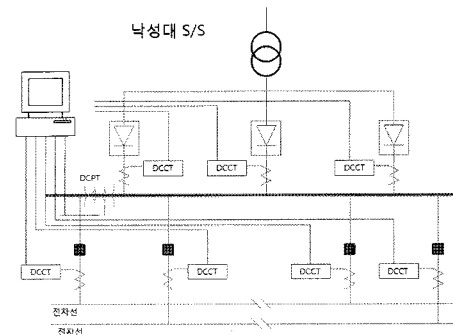


Fig. 8. Measuring points of power input/output in substation

소비 및 회생전력량 측정장치는 모니터링 시스템, 전압 센서, 전류센서, 전원공급장치로 구분되며, 각 장치의 기본 사양은 3.1절의 전동차 회생에너지 측정 및 분석에서 제시된 사양과 같다.

전력량 측정방법은 정류기 2차측 전류와 가선 전압을 통해 소비전력을 측정하고 가선전압과 Feeder측 전류를 통해 타 차량에 사용되는 소비전력량과 선로손실량을 분석하여 향후 에너지저장장치에 저장될 회생전력량을 계산하였으며, 근처 변전소로부터 유입된 전류는 고려하지 않았다.

변전소 에너지 측정결과를 Table 5에 보인다. 낙성대 변전소를 기준으로 측정데이터를 산출하였으며 시간대별로 소비전력량과 회생전력량을 구하여 누적하였다. 단, 전력요금은 90 [원/kWh]로 산정하였다.

측정된 데이터를 통해 차량의 소비전력량의 20%내외에서 회생에너지가 활용될 수 있음을 알 수 있다.

Table 5. Measurement in Nakseongdae substation

날 짜	소비전력량 [kWh/일]	회생전력량 [kWh/일]	소비전력량 [원/일]	회생전력량 [원/일]	회생율 [%]
2007.1.30	32,957.15	-6,849.70	2,966,144	616,473	20.8
2007.1.31	34,709.95	-6,363.85	3,123,896	572,747	18.3
2007.2.01	35,255.65	-6,498.60	3,173,009	584,874	18.4
2007.2.02	34,443.75	-6,793.30	3,099,938	611,397	19.7
2007.2.03	31,819.05	-5,837.50	2,863,715	525,375	18.3
2007.2.04	25,400.85	-6,340.70	2,286,077	570,663	25.0
평균 값	32,431.07	-6,447.28 [kWh/일]	2,918,796	580,255 [원/일]	20.0

결과 값을 통해서 서울메트로 2호선 낙성대 변전소에 에너지저장시스템을 설치시 약 20%의 에너지를 저감할 수 있으며, 1일 평균 580,255원으로 연간 약 2.1억원의 에너지 절감을 이룰 수 있음을 알 수 있다. 또한 서울 2호선에 13개의 변전소가 있으므로 2호선 전체 에너지 절감은 약 27.5억원이 될 것으로 예상된다. 에너지저장시스템을 대당 8억원으로 가정할 때 낙성대 변전소 투자대비 회수기간은 3.78년이 되고, 또한 전체 설치비용은 104억원이 되므로 2호선 전체 투자비 대비 회수기간은 3.78년으로 예상된다.

### 3.4 변전소 전력시뮬레이션에 의한 경제성 분석

전동차 소비 및 회생에너지 시뮬레이션 결과를 통해 주중 및 주말 운행 시격별 전력시뮬레이션을 수행한다. 전력시뮬레이션을 위한 입력조건은 다음과 같다.

- 노선 : 서울메트로 2호선(을지로 입구 ~ 시청간 순환선)
- 차량 : 10량1편성
- 역수 : 43개역
- 역 정차시간 : 30초
- 변전소 : 2호선 13개 변전소

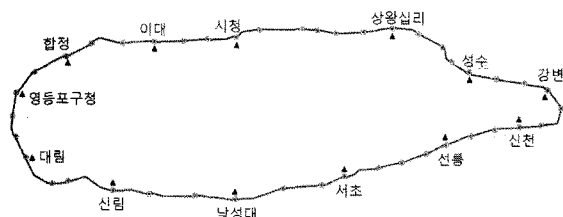


Fig. 9. Substation locations on line 2

- 운전 시격
- 평일 : 첨두시(2분30초), 비첨두시(5분30초)
- 토요일 및 공휴일 : 5분 30초

#### 3.4.1 낙성대 변전소

에너지저장시스템을 낙성대 변전소 1곳에만 설치하는 것으로 시뮬레이션을 수행한다.

전력시뮬레이션 결과, 서울메트로 2호선 낙성대 변전소에 에너지저장시스템을 설치하면 평일 6,021.43kWh, 주말 6,541.81kWh를 절감할 수 있어 1년 동안 약 2.02억원을 절약할 수 있다. 또한 에너지저장시스템을 대당 8억원으로 가정할 때 투자비 대비 회수기간은 3.95년이 된다.

Table 6. Saving cost per year for Nakseongdae Substation (Simulation)

구분	1일 절감에너지 (kWh)	1일 절감액 (원)	1년 절감액 (원)
평일	첨두시	856.84	541,929
	비첨두시	5,164.59	
주말	-	6,541.81	588,763
계			202,674,743

낙성대 변전소에 대한 시뮬레이션 결과 실측과 변전소의 투자대비 회수기간의 결과가 거의 동일함을 알 수 있다.

#### 3.4.2 서울메트로 2호선 13개 변전소

에너지저장시스템 설치 위치를 전체 13개 변전소로 하였다.

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

Table 7. Saving cost per year for 13 Substation(Simulation)

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

전체 변전소 시뮬레이션 결과도 실측과 변전소의 결과가 거의 동일함을 알 수 있다.

이유는 서울메트로 13개 변전소에 대해 실측이 되지 않았지만 낙성대와 비슷한 결과 값을 얻을 것이라고 가정해서 전체 측정값을 도출하였다. 즉, 낙성대 변전소의 에너지 절감율이 전체 변전소의 평균에 해당할 것이라는 의미가 된다. 시뮬레이션 결과, Fig. 11처럼 낙성대 변전소의 에너지 절감율이 평균값에 해당하여 결과적으로 실측결과와 시뮬레이션 결과가 거의 동일한 값을 나타내게 된 것이다.

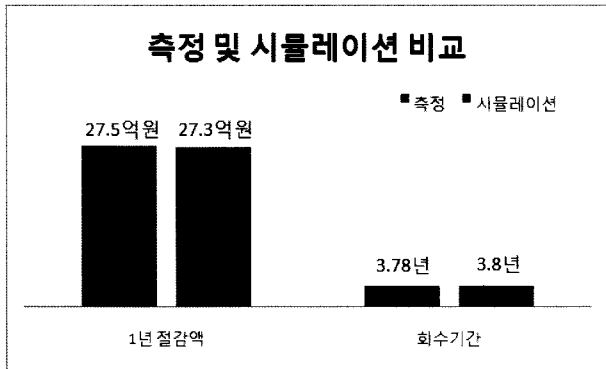


Fig. 10. Measurement and simulation (saving cost vs. ROI (Return On Investment))

2호선 13개 변전소에 대하여 각 변전소별 에너지 절감율을 분석하였다. 그 결과 평균 15.1%로 나타났다.

또한 설치 투자대비 회수 기간을 검토하였다. 투자대비 회수기간은 평균 약 4년으로서 최소 2.23년에서 최대 6.33년으로 나타났다.

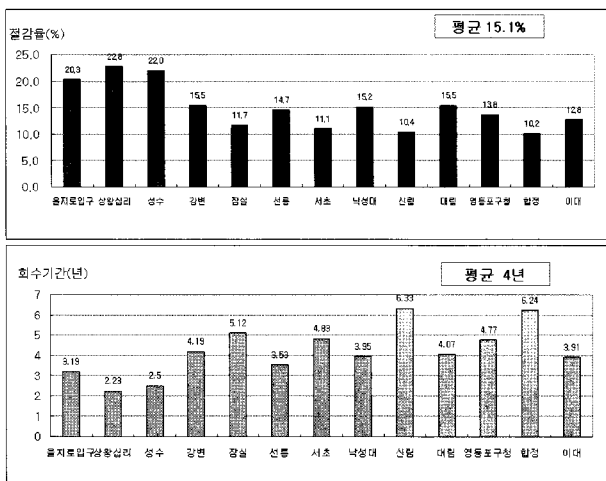


Fig. 11. Saving rate and ROI on substations of line 2

에너지저장시스템의 저장매체로 사용될 슈퍼캐패시터의 유지보수 기간은 이론적으로는 반 영구적이지만 실제적으로는 10년~15년 정도로 고려되고 있다. 따라서 10년을 고려할 때 도시철도 운영기관은 변전소별 약 4년~8년 정도는

이익을 낼 수 있는 기간이라고 판단된다. 이 기간 동안 유지보수비 및 인건비 등을 제외하고도 충분한 이익을 낼 수 있을 것으로 판단된다. 서울메트로 2호선은 운전 시격이 가장 짧은 조건이다. 이러한 조건에서도 연간 에너지 절감비는 27.3억원이고, 변전소별 연간 에너지 절감비는 Fig. 12와 같다. 따라서 에너지저장시스템을 전국의 도시철도 운영기관 노선에 적용하기에 충분한 경제적 효과가 있을 것이라 사료된다.

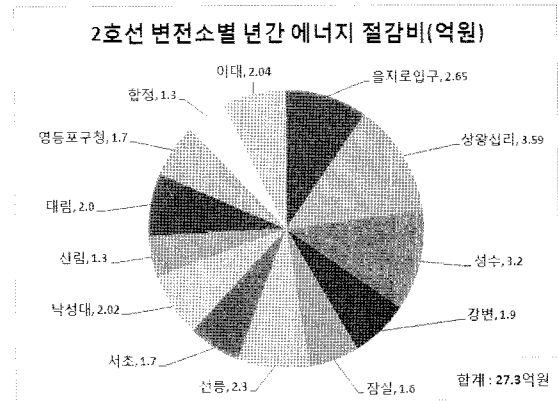


Fig. 12. Saving cost per year on substations of line 2

#### 4. 결론

현재 지하철 전동차 회생에너지는 차량 속도를 감속할 때 많은 양이 발생하지만 전차선에서 회생에너지 활용은 극히 적고, 다만 출발 전동차와 회생 전동차가 동시에 이루어 질 경우에는 일부 활용이 되지만 이 경우는 높지 않아 회생에너지 활용이 떨어지고 있는 실정이다. 따라서 전차선에서 낭비되었던 회생 에너지를 충분히 활용 할 수 있도록 에너지저장시스템 도입이 필수적이다.

서울메트로 2호선 에너지저장시스템 적용에 따른 경제성 분석 결과 연간 3,037만kWh 이상의 전력을 절감 할 수 있고, 평균 4년 이내 설치 투자비를 회수할 수 있을 것으로 분석되었다. 또한 2호선 13개 변전소의 연간 에너지 절감액은 27.3억원으로 에너지저장시스템을 전국의 도시철도 운영기관 노선에 적용하기에 충분한 경제적 효과가 있을 것이라 사료된다.

따라서 고유가 시대에 도시철도 운영기관의 에너지 절감을 위한 가장 현실적인 대응 방안으로서 국가발전에 기여할 것으로 예상된다.

뿐만 아니라 에너지저장장치에 저장된 에너지가 피크치 소비에너지를 줄이기 위해 공급하게 되므로 도시철도 운영기관의 피크 전력요금 절감이 가능하여 추가적인 절감이 가능하다. 그리고 전동차 제동시 발생하는 회생에너지는

전동차에 공급되는 가선전압을 상승시켜 전동차의 전자기기에 악영향을 미치고 있는데, 이 영향을 줄일 수 있어 유지보수성과 차량기기의 수명을 높여 운영기관의 유지보수 비용도 추가적으로 줄일 수 있는 효과가 예상된다.

## 참고 문헌

1. SIEMENS AG(2005), "SITRAS SES, Energy storage system for mass transit system."
  2. 김길동, 김종대, 이한민(2005), "전동차 회생 에너지 저장시스템 개발에 관한 연구," 한국철도학회 추계학술대회논문집. pp. 24-28.
  3. 김길동, 이한민(2006), "전동차 회생에너지 활용을 위한 저장시스템 기술," 한국조명·전기설비학회 특집/차세대 전동차시스템 기술동향, Vol. 20, No. 2, pp. 10-15.
  4. 이한민, 김길동, 이장무(2006), "도시철도시스템을 위한 전기이중층 캐패시터 적용에 관한 연구," 대한전자공학회 하계학술대회 논문집, 제29권 제1호, pp. 901-902.
  5. 김길동, 이한민, 오세찬(2008), "도시철도 회생 에너지저장시스템 설치 및 시험," 대한전기학회 전력계통연구회 춘계학술대회 논문집, pp. 172-174.
  6. Hanmin Lee, Gildong Kim, Changmu Lee(2008), "Development of ESS for Regenerative Energy of Electric Vehicle," WCRR, pp. 476-478
  7. Hanmin Lee, Gildong Kim, Sehchan Oh, Wootae Jeong(2008), "A Study on Effects of Energy Saving by applying Energy Storage System," ICEE No.P-202, pp. 1-5
  8. 한국철도기술연구원(2008), "에너지저장시스템 기술개발 3차년도 보고서."
  9. 한국철도기술연구원(2007), "에너지저장시스템 기술개발 2차년도 보고서."
  10. Hanmin Lee, Gildong Kim, Changmu Lee(2007), "Analysis for EDLC Application on Electric Railway System," PCC nagoya, pp. 226-229.
- 접수일(2009년 4월 28일), 수정일(2009년 5월 22일),  
게재확정일(2009년 8월 7일)