

에너지저장시스템의 서울메트로 2호선 적용 효과에 관한 연구

A Study on Effect of Applying Energy Storage System on SeoulMetro Line 2

안천현†, 이한민*, 김길동**, 이희성***
Cheon Heon An, Han Min Lee, Gil Dong Kim, 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 issue 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. For such new energy saving, the Energy storage system is considered for saving energy. Energy saving is possible by efficient use of regenerated energy. Regenerated energy is recycled amongst vehicles by mean of charge and discharge corresponding to powering and braking of electric vehicle operations. This energy saving contributes to cut CO2 to reduce greenhouse gas emissions. Recycling regenerated energy demonstrate significant effect on peak cut of consumption energy in railway substation. Absorption of excess energy avoids regeneration failure due to high traction voltage. This paper presents effects by applying the energy storage system to SeoulMetro Line 2.

1. 서론

에너지저장시스템은 전동차 제동시 발생된 회생 에너지를 에너지저장시스템에 저장하고 전동차가 역행할 때 전차선 전압이 떨어지게되면 에너지저장시스템으로부터 에너지를 방전한다. 따라서 에너지저장시스템은 도시철도시스템에서 회생에너지의 활용을 위한 최적 조건을 만든다. 결과적으로 동시에 역행과 제동하는 차량이 존재하지 않을 지라도 차량 간 에너지의 완전한 교환이 이루어 질 수 있다. 따라서 에너지저장시스템은 에너지를 저장하고 재활용하기 위한 유용한 장치이다.

운행 시격이 짧은 경우보다 큰 경우 전동차 회생시 회생 에너지가 모두 에너지저장시스템으로 저장되므로 저장된 에너지를 활용하게되어 도시철도 운영기관의 에너지 재활용율이 높아지게 된다. 또한, 국내에서 운행 중인 전동차 중에는 초퍼전동차와 VVVF 전동차가 있는데, 두 차종 모두 회생에너지를 발생하지만 VVVF 전동차보다 초퍼전동차가 회생율이 낮은 특징이 있다. 따라서 본 논문은 에너지저장시스템을 적용하는데 있어서 악조건인 운행 시격이 가장 짧고 초퍼전동차가 상당히 많이 운행되고 있는 서울메트로 2호선을 대상으로 에너지저장시스템 적용 효과를 에너지절감 측면에서 현장 실측과 시뮬레이션을 통해 분석하고자 한다.

2. 에너지저장시스템

직류 도시철도의 전압 공급방식은 한전에서 공급받은 AC전압을 정류기를 통해 정류하고 DC전압으로 변환하여 공급하는 방식으로, 정류기는 순방향 다이오드 방식으로 회로가 연결되어 있어 전동차의 회생 전력은 전원측으로 반환되지 않는 구조이며, 전동차의 회생 에너지를 전차선에 그대로 되돌리는 경우, 회생시 순간적으로 발생된 에너지가 전차선전압을 변동하게 하여 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.

에너지저장시스템은 직류 도시철도 구간에서 전동차 제동시 발생한 회생에너지를 에너지저장시스템에 저장하고, 저장된 에너지를 전동차 역행시에 전동차에 공급하는 것으로 전동차 운행 중 발생하는 에너지를 재활용하는 시스템이다. 즉, 에너지저장시스템은 변전소의 모선에 연결되어 그림 1(a)와 같이 전동차가 회생할 때 전동차에서 발생된 에너지에 의해 전차선 전압이 올라가면 이 에너지가 에너지저장시스템에 저장되고, 그림 1(b)와 같이 전동차가 역행을 하면 전차선 전압이 내려가므로 에너지저장시스템은 이 에너지를 전차선을 통해 전동차에 공급하게 되어 에너지절감이 가능하다.

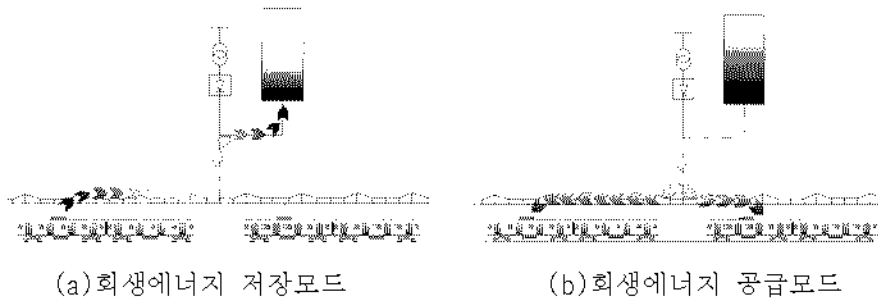


그림 1. 회생 에너지 저장 및 공급 모드

3. 전동차 회생에너지 측정 및 시뮬레이션

서울메트로 2호선 내선구간(신도림에서 시청방향)을 운행하는 전동차를 대상으로 회생에너지를 측정한다. 데이터는 1ms 기준으로 전압 및 전류를 측정하며 이 값을 기준으로 전동차의 소비전력과 회생전력을 나타낸다.

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

측정결과 역행전력은 약 940kWh ~ 1220kWh이며 회생에너지는 430kWh ~ 566kWh 이다. 또한 전동차 회생 에너지율은 평균 45.7% 이다.

서울메트로 2호선을 대상으로 전동차 성능 시뮬레이션(TPS, Train Performance Simulation)를 수행하여 측정 결과와 비교·분석한다. 시뮬레이션 결과 그림 2와 같이 전동차 실측 결과와 거의 동일한 패턴의 결과를 얻었으며, 또한 회생율은 45.9%로 실측과 거의 동일한 결과를 얻었다.

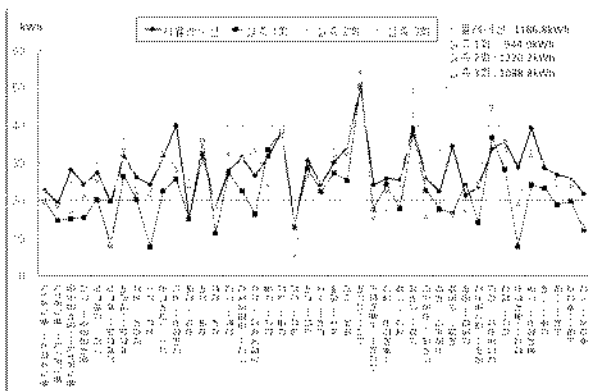


그림 2. 소비에너지 측정 및 시뮬레이션

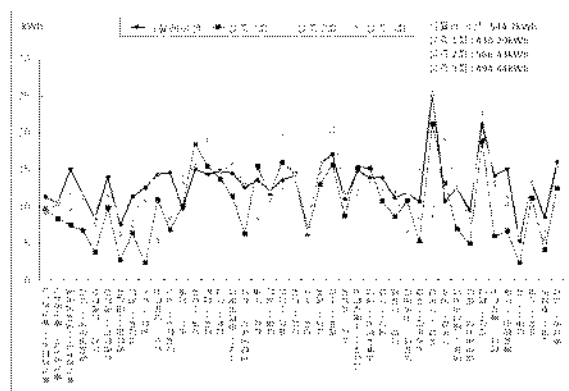


그림 3 회생에너지 측정 및 시뮬레이션

전동차 소비 및 회생에너지 결과를 주중 및 주말 운행 시격별 전력시물레이션에 적용한다.

4. 변전소 회생에너지 측정에 의한 경제성 분석

변전소에서 소비전력 및 회생전력을 측정함으로써 에너지저장시스템 설치 및 운용시 경제성을 검토하고자 한다. 변전소는 서울메트로 2호선 낙성대 변전소를 대상으로 측정한다. 낙성대 변전소의 소비전력 측정 위치는 가선전압 1개소, 정류기 2차측 3개소, Feeder 4개소를 측정하였다.

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

변전소 에너지 측정결과를 표1에 보인다. 낙성대 변전소를 기준으로 측정테이터를 산출하였으며 시간대별로 소비전력과 회생전력을 구하여 누적하였다. 단, 전력요금은 90 [원/kWh]으로 산정하였다. 측정된 테이터를 통해 차량의 소비전력의 20%내외에서 회생에너지가 활용될 수 있음을 알 수 있다.

표 1. 변전소 에너지 측정결과

날 짜	소비전력 [kWh/일]	회생전력 [kWh/일]	소비전력 [원/일]	회생전력 [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	64,862.10	-12,909.40[kWh/일]	2,918,796	580,255 [원/일]	20.1

결과 값을 통해서 서울메트로 2호선 낙성대 변전소에 에너지저장시스템을 설치시 약 20%의 에너지를 저장할 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 27.5억원이 될 것으로 예상된다. 에너지저장시스템을 대당 8억원으로 가정할 때, 전체 설치 비용은 104억원이 되므로 2호선 전체 투자비 대비 회수기간은 3.78년으로 예상된다.

5. 변전소 전력 시물레이션에 의한 경제성 분석

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

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

· 변전소 : 2호선 13개 변전소

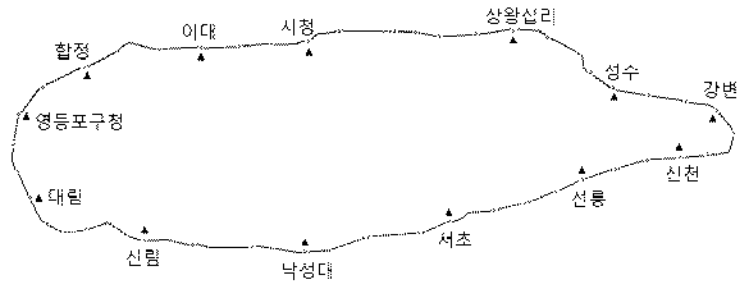


그림 4. 2호선 변전소 위치

· 운전 시격

서울메트로 2호선 운전시격은 평일과 주말로 구분되며, 평일은 첨두시와 비첨두시로 나누어 진다.

표 2. 서울메트로 2호선 운전시격

구 분		운전 시격
평일	첨두시	2분30초
	비첨두시	5분30초
토요일 및 공휴일	구분 없음	5분30초

에너지저장시스템 설치 위치는 전체 13개 변전소로 하였다.

에너지저장시스템 설치시 전력시뮬레이션 결과, 서울메트로 13개 변전소에 대한 1년 사용 에너지는 200,487,046kwh, 절감 에너지는 30,374,687kwh로서 1년 동안 약 27.3억원을 절약할 수 있다. 또한 에너지 저장시스템을 대당 8억원으로 가정할 때 13개 변전소 설치비용은 104억원이 되고 투자비 대비 회수기간은 3.8년이 된다.

표 3. 서울메트로 2호선 13개 변전소에 대한 시뮬레이션 결과

구분	1년 사용 에너지 (kwh)	1년 절감 에너지 (kwh)	1년 절감액 (원)
평일	149,079,402	21,145,829	1,903,124,000
주말	51,407,644	9,228,859	830,597,000
계	200,487,046	30,374,687	2,733,721,000

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

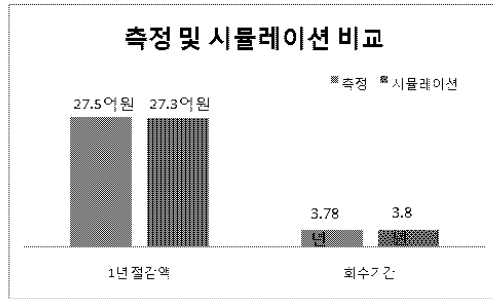


그림 5. 측정 및 시뮬레이션 비교·분석

2호선 13개 변전소에 대하여 각 변전소별 에너지 절감율을 분석하였다. 그 결과 평균 15.7%로 나타났다.

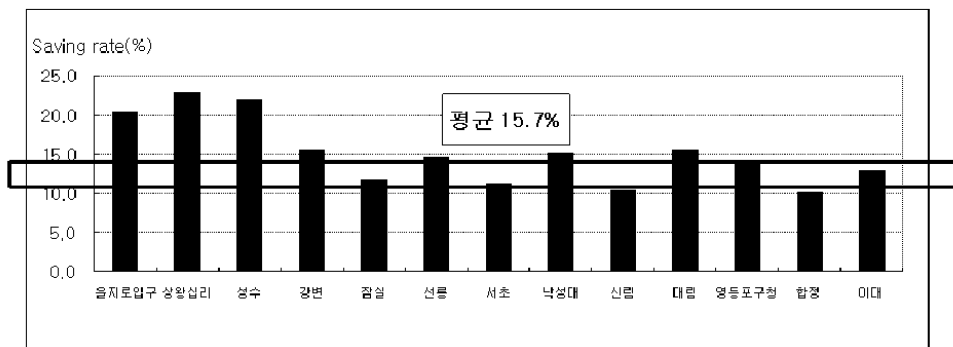


그림 6. 서울메트로 2호선 변전소별 에너지절감율

6. 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 일부분 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 2,995만kwh 이상의 전력을 절감해 약 27억원을 절약 할 수 있고, 약 3.8년 이내 설치 투자비를 회수할 수 있을 것으로 분석되었다.

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

[참 고 문 헌]

- [1] Hanmin Lee, Gildong Kim, Changmu Lee, "Development of ESS for Regenerative Energy of Electric Vehicle", WCRR 2008
- [2] Hanmin Lee, Gildong Kim, Sehchan Oh, Wootae Jeong, "A Study on Effects of Energy Saving by applying Energy Storage System", ICEE 2008
- [3] Hanmin Lee, Sehchan Oh, Changmu Lee, Gildong Kim, "Factory test for Development of Energy Storage System", International Conference on Control, Automation and Systems 2008
- [4] 김길동, 이한민, 오세찬, "도시철도 회생 에너지저장시스템 설치 및 시험", 대한전기학회 전력계통연구회 춘계학술대회 논문집, 2008
- [5] 한국철도기술연구원, "에너지저장시스템 기술개발 3차년도 보고서", 2008. 10
- [6] Hanmin Lee, Gildong Kim, Changmu Lee, "Analysis for EDLC Application on Electric Railway System", PCC nagiya 2007
- [7] 이한민, 김길동, 이장무, "에너지저장장치의 설치위치에 관한 연구", 대한전기학회 전기기기 및 에너지변환시스템부문 춘계학술대회 논문집, 2007
- [8] 한국철도기술연구원, "에너지저장시스템 기술개발 2차년도 보고서", 2007. 10
- [9] Hanmin Lee, Gildong Kim, Sehchan Oh, "A Study for Applying Energy Storage System on Korean Urban Transit System", ICEE 2006
- [10] 김길동, 이한민, "전동차 회생에너지 활용을 위한 저장시스템 기술", 한국조명·전기설비학회 특집/차세대 전동차시스템 기술동향, 2006. 4 Vol.20, No.2
- [11] 이한민, 김길동, 이장무, "도시철도시스템을 위한 전기이중층 캐패시터 적용에 관한 연구", 대한전자공학회 하계학술대회 논문집, 2006, 제29권 제1호
- [12] SIEMENS AG, "SITRAS SES, Energy storage system for mass transit system", 2005