

도시철도시스템용 에너지저장시스템 용량설계에 관한 연구

이 한민¹⁾, 김 길동²⁾, 이 장무³⁾

A Study on Capacity Design of Energy Storage System for Urban Transit System

HanMin Lee, GilDong Kim, ChangMu Lee

Key words : Regenerative energy(회생에너지), Saving energy(에너지절감), Substation(변전소), Energy storage system(에너지저장시스템)

Abstract : Six thousands of vehicles are operated on Korean urban transit system. 95% of them have regeneration system. Especially, the VWF-Inverter vehicle has a merit of the highest regeneration rate. Therefore, the energy storage system is needed to be developed to use regeneration energy when the vehicle is braking. Therefore, Measuring regeneration energy in the substation need to know how much regeneration energy occurs, how much capacity of energy storage system is needed. After measuring regeneration energy, we design the capacity of energy storage system.

1. 서 론

전 세계적으로 에너지의 보전과 재활용의 방안 및 새로운 에너지의 개발을 위한 여러 가지의 연구들 가운데 제3의 에너지원의 개발과 에너지의 소모를 줄이는 전력변환장치 및 시스템의 효율증설을 위한 노력과 더불어 에너지의 재활용을 위한 각종 방안들이 고려되고 있으며, 에너지 재활용의 방안 중에서 소모성의 에너지를 저장하는 기술의 발전이 가장 눈부시다고 할 수 있다. 그 중에서 철도시스템의 경우는 에너지의 종류에서도 디젤, 석탄, 가스, 전기 등 다양한 에너지를 활용하고 있는데, 그중에서 가장 많이 활용되는 에너지는 전기에너지를 사용하는 전동차가 주류를 이루고 있는 실정이다. 도시 간을 잇는 고속전철과 도심의 교통을 해소하는 통근형 전동차 지역의 연계를 위한 경량 전철 등이 그 주류를 이루는 시스템이다.

철도 시스템은 에너지의 소모를 통해 추진력을 얻고 이를 기반으로 차량의 동력을 사용하는 시스템으로 제동시에 가선으로의 회귀하는 회생의 에너지를 발전함으로 제동력과 회생전기에너지를 생산하는 특징이 있다. 따라서 이미 여러해 전부터 국외의 선진국에서는 회생에너지의 활용을 위한 여러 가지의 방법들을 연구하였고 그중에서 차량 및

변전소와 역사내부와 역과 역 사이에서 차량의 회생에 의한 전기에너지를 저항에 의한 소모를 배제하고 재활용하기 위한 에너지 저장방식에 관한 연구가 진행되고 있다.

따라서 본 연구에서는 도시철도 변전소에서 회생에너지를 측정후 이에 적합한 에너지저장장치의 용량을 계산하고 에너지저장장치를 설계 및 제작한 내용을 다루고자 한다.

2. 도시철도 변전소 회생에너지 측정

에너지 저장장치의 계통연계환경 파악을 위해 직류변전소의 가선전압 변동율과 상하선간의 회생 전력량 및 회생전류품질을 측정하고자 서로 인접해 있는 3개의 변전소를 동시에 측정하였다.

변전소는 2,3개의 역사 사이에 1개씩 설치되어

-
- 1) 한국철도기술연구원
E-mail : hanmin@krri.re.kr
Tel : (031)460-5423 Fax : (031)460-5749
 - 2) 한국철도기술연구원
E-mail : gdkim@krri.re.kr
Tel : (031)460-5710 Fax : (031)460-5749
 - 3) 한국철도기술연구원
E-mail : cmlee@krri.re.kr
Tel : (031)460-5421 Fax : (031)460-5749

있으며, 상행, 하행선 모두 같은 모선을 사용하고 있으므로 변전소에서의 소비전력 및 회생전력을 측정함으로써 에너지저장장치의 설치 및 운용시의 경제성을 검토하고자 하였다.

변전소는 혼잡구간과 비혼잡구간으로 설정하여 서울 메트로 2호선 및 4호선에 대해 측정하고자 하였으나 4호선의 충신대 역사의 경우, 모선의 부스바를 측정할 수 있는 센서를 판매 및 주문제작할 수 있는 기관이 없어 혼잡구간인 2호선 변전소만 측정하였다. 인접한 역사의 전압 및 전류를 동시에 검토하고자 신림, 낙성대, 서초 변전소에 회생에너지를 측정할 수 있는 회생 에너지 측정장치 3대를 설치하고 시간을 동기화하여 Feeder 8개소를 측정하였다.

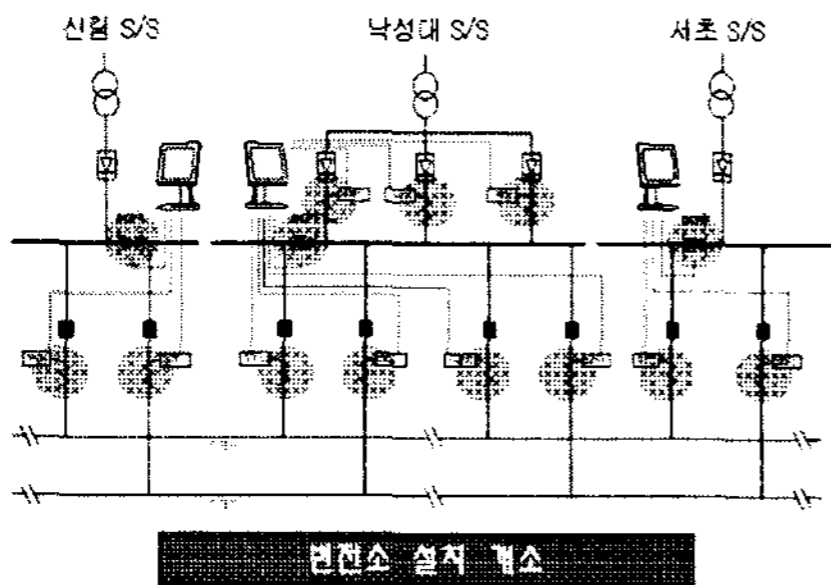


그림 1. 변전소 모선의 구성도

가. 변전소 회생에너지 측정 일시

- (1) 측정 일시 : 2007년 1월 29일 ~ 2007년 2월 5일(6일간)
- (2) 측정 장소 : 서울메트로 2호선 낙성대 변전소, 신림 변전소, 서초 변전소

나. 변전소 회생에너지 측정 개소

낙성대 변전소의 소비전력 측정 위치는 그림1의 붉은 색으로 표시한 지점으로 가선전압 3개소, 정류기 2차측 3개소, Feeder1~8 8개소를 측정하였다.

- (1) 낙성대 변전소 (1세트)
 - 설치 개소 : 정류기 출력전류 (3개소), Feeder 출력전류 (4개소), DCPT 전압 (1개소)
 - 측정 장치 : 1 set
- (2) 신림 변전소 (1세트)
 - 설치 개소 : Feeder 출력전류 (2개소), DCPT 전압 (1개소)
 - 측정 장치 : 1 set
- (3) 서초 변전소 (1세트)
 - 설치 개소 : Feeder 출력전류 (2개소), DCPT 전압 (1개소)
 - 측정 장치 : 1 set

다. 회생에너지 측정장치 사양

(1) 모니터링 시스템

실시간 데이터 수집을 위한 모니터링 장치는 자체 제작하고 자체 시험을 통해서 장착되었다. 주 연산을 실행하는 디지털 신호처리는 TMS320c32이며 5mS의 샘플링을 통해서 데이터 값을 수집한다. 샘플링된 데이터는 CF Card에 기록하고, 기록된 데이터를 PC 분석용 프로그램을 통해서 분석 및 표출한다. 제어기의 제원은 표1과 같다.

표 1. 제어기 제원

주요제원	규격	용도
DSP	TMS320c32 - 60Mhz	연산처리
데이터 기록메모리	Compact Flash Memory 2Giga Byte	수집된 데이터 기록
LCD	Graphic LCD	현재상태 표출
데이터 저장메모리	DS1245Y	실시간 데이터 저장
A/D Converter	AD7891AS-1	아날로그 신호 변환기
Photo Coupler	TLP620-4	디지털 입력신호 절연용
Isolation Amp	AD202JY	아날로그 신호 절연입력
Timer IC	DS12c887	시계 IC
Power Source	DC100V/5V,+15V,-15V	제어전원공급

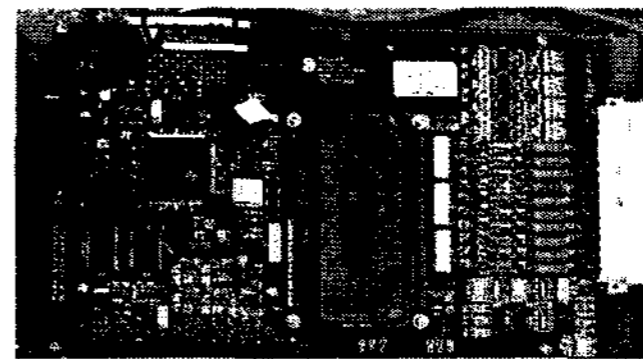


그림 2. 회생에너지 측정장치

(2) 전압센서 (DCPT 2516)

전압센서는 모선의 전압을 DCPT를 사용하여 300: 1로 낮추어서 제어기로 입력한다. 사양은 다음과 같다.

- Sensor Scale:3,000V/10V
- Rated Voltage:1,800Vdc
- Polarity:Unipolar
- Purpose:Voltage measurement of filter capacitor

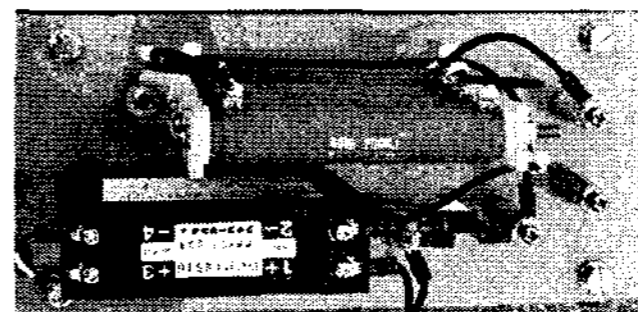


그림 3 DCPT 외형 사진

(3) 전류센서 (KLL3.0K-10VD)

전류센서는 별도의 주문 제작을 통하여 탈,부

착이 용이하도록 설계되었으며 이를 통하여 변전소 모선에 별도의 조작없이 취부할 수 있었다.

Sensor Scale:3000A/10V

Polarity:Bipolar

Purpose:Current measurement of Feeder

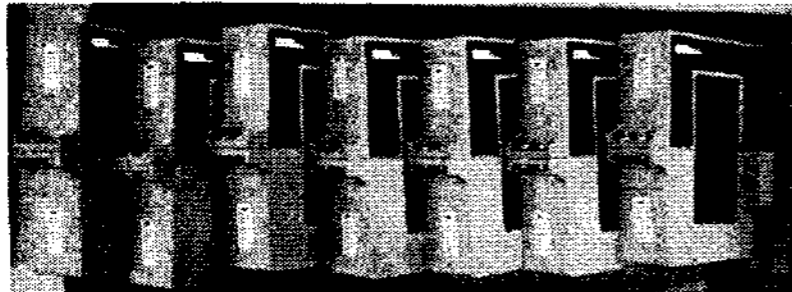


그림 4. DCCT 외형 사진

3. 측정데이터 분석

변전소 에너지 측정결과를 표2에 보인다. 낙성대 변전소를 기준으로 측정데이터를 산출하였으며 시간대별로 소비전력과 회생전력을 구하여 누적하였다. 단, 전력요금은 90 [원/kWh]으로 산정하였다.

표 2. 변전소 에너지 측정결과

날 짜	소비전력 [kWh/일]	회생전력 [kWh/일]	소비전력 [원/일]	회생전력 [원/일]	회생 비율[%]
2007.1.30	65,914.3	-13,699.4	5,932,289	1,232,942	20.8
2007.1.31	69,419.9	-12,727.7	6,247,794	1,145,496	18.3
2007.2.01	70,511.3	-12,997.2	6,346,014	1,169,747	18.4
2007.2.02	68,887.5	-13,586.6	6,199,879	1,222,794	19.7
2007.2.03	63,638.1	-11,675.0	5,706,640	1,044,257	18.3
2007.2.04	50,801.7	-12,770.2	4,565,229	1,147,831	25.1
평균 값	64,862.1	-12,909.4	5,832,974	1,160,511	20.1

측정된 데이터를 통해 차량의 소비전력의 20%내외에서 회생에너지가 발생됨을 알 수 있다. 그림5는 발생된 여러 가지 패턴의 가선전압의 변동을 보인다. 기준선은 빨간색을 나타내며 가선전압 DC1650V인 경우를 나타낸다. 기준선의 위쪽으로 나타나는 부분이 상승된 가선전압을 의미하며 이는 곧 차량의 회생시 발생하는 에너지를 의미한다. 반면에 아래로 나타나는 부분은 강하된 가선전압을 나타내며 차량에서 사용하는 소비에너지를 의미한다. 그림에서 알 수 있듯이 소비에너지와 회생에너지는 사이클을 가지고 존재하며 일정시간 계속해서 소비를 한다든가, 회생을 하는 구간은 발생하지 않았다. 단지 그림 5의 (a)나 (b)와 같이 회생에너지나 소비에너지가 좀 더 많은 양으로 치우쳐 나타나는 경우는 존재했다.

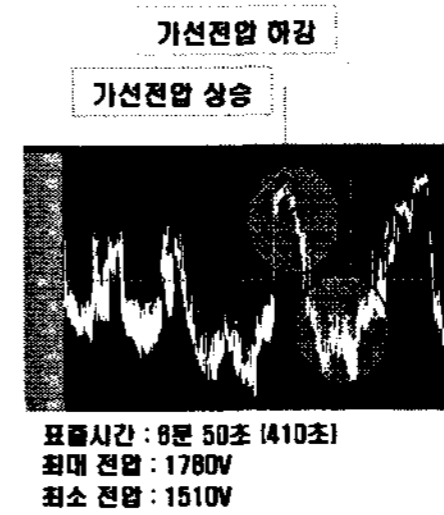
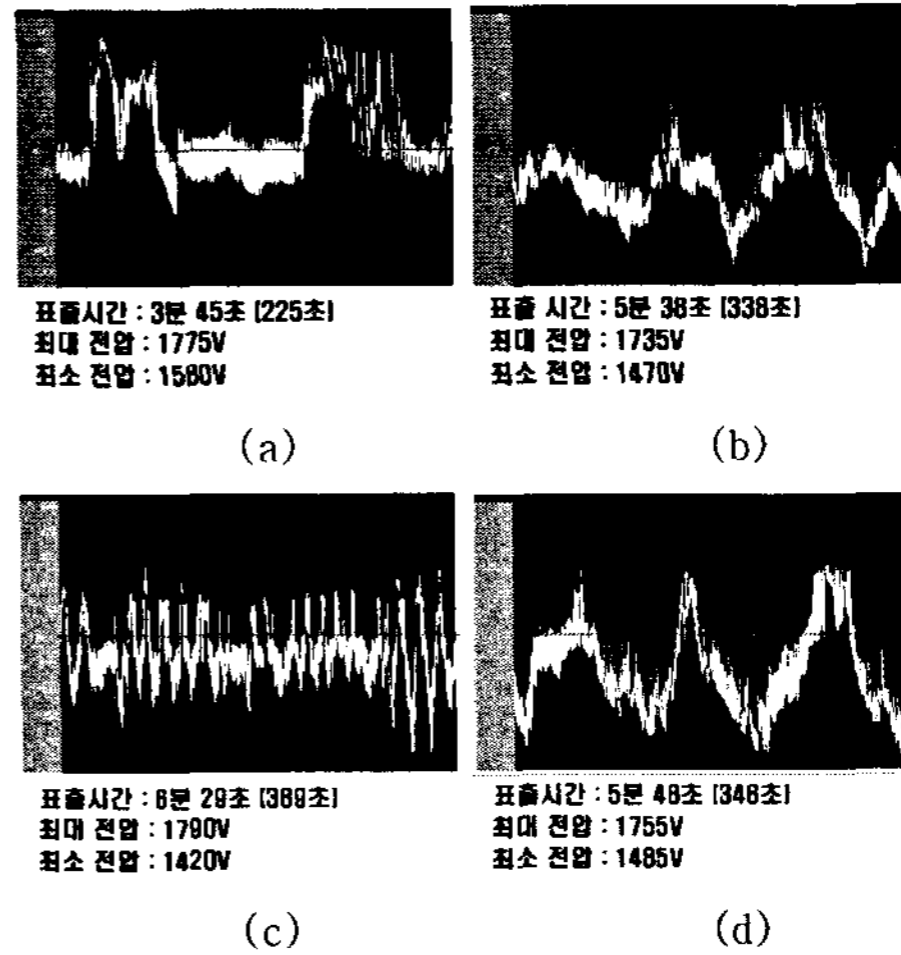


그림 5. 가선 변동 패턴

그림 6은 측정된 가선전압의 회생 및 소비 사이클을 측정한 결과 값으로 회생시간보다 소비시간이 상대적으로 1.5~2배 길게 나타남을 확인할 수 있다. 그림 7은 측정된 데이터에서 회생되는 구간에서 누적된 회생에너지와 소비되는 구간에서 누적된 소비에너지를 [Wh] 단위로 산출하였다. 결과 값을 통해서 차량 소비전력의 20%의 에너지가 회생에너지로 발생됨을 확인할 수 있으며, 1년 최대 회생 에너지량(낙성대)은 1일 평균 1,160,511 원으로 약 4억원의 에너지 절감을 이룰 수 있음을 알 수 있다.

결과적으로 소비전력의 20%에 해당하는 회생에너지는 회생시 에너지 저장장치에 저장되고, 회생사이클에 비해서 상대적으로 긴 소비 사이클에서 저장된 20%의 에너지를 방출함으로써 회생에너지를 100% 재활용할 수 있는 장점을 가질 수 있게 된다. 또한, 그림 5에서 알 수 있듯이 에너지 저장장치를 설치하지 않은 경우 가선전압이 1420V~1800V까지 광범위하게 변동되고 있으나, 에너지 저장장치를 설치하게 되는 경우, DC 1650 이상의 전압에 해당하는 에너지는 모두 흡수되고, 1580V 이하의 소비 전력에 대해서는 저장장치에서 공급

하므로 가선전원을 DC 1580V ~ DC 1650로 유지할 수 있는 장점을 가지게 된다.

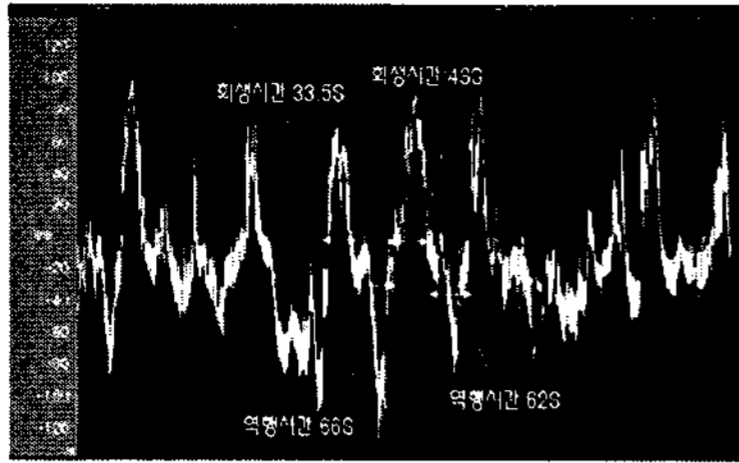


그림 6. 가선에서의 역행 및 회생시간

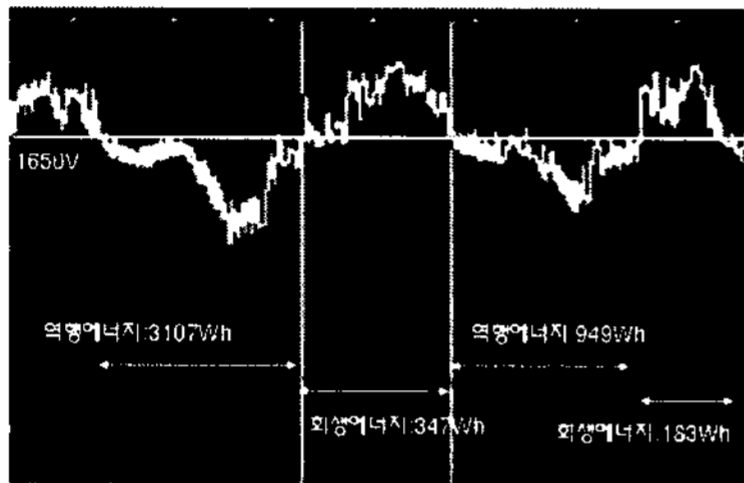


그림 7. 기준전압에서의 역행 및 회생에너지

4. 에너지저장장치 용량 계산

에너지 저장장치는 정의된 입력전압 이상인 경우, 에너지를 흡수하여 회생되는 에너지를 재활용 하는데 그 의의가 있다. 그림 3.40은 회생 에너지를 표시하는 측정파형으로 그래프는 1,680V 이상인 경우에 대해서 + 또는 -의 값으로 떨어지는 양을 표시하였다. 충전개시 전압은 무부하 상태 전압 (1600V ~ 1650V) 이상의 값(1,650V ~ 1,700V)으로 산정하고 그 이상의 전압은 슈퍼 캐패시터로 충전을 수행한다. 충전동작은 가선전압을 일정전압으로 유지시키게 된다. 또한 차량의 역행시 발생하는 저전압은 1,580V로 설정해, 그 이하의 전압에서 역행하는 차량에 에너지를 공급하는 것으로 한다.

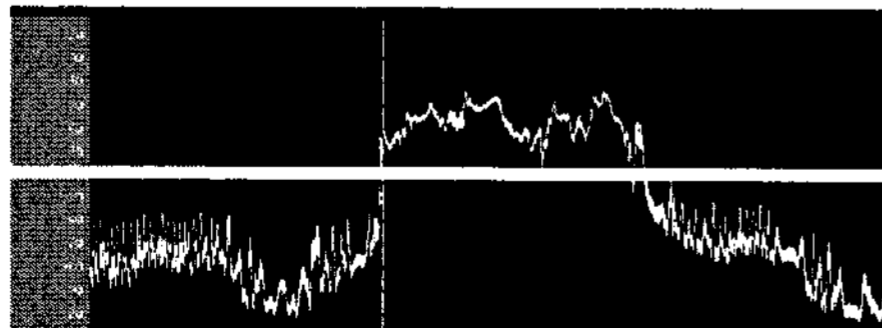


그림 8. 회생 에너지량 그래프 (측정파형 : 유지시간 48초)

측정된 변전소의 데이터를 근거로 에너지량을 산정하면 유지시간 48초, 에너지량은 498.476 [Wh]가 산출된다. 이는 낙성대 변전소의 에너지량을 산출한 값이며, 여기에 인접 변전소(신림, 서초변

전소)에서의 전력유입량을 계산하여 747.714 [Wh]로 설계하였다.

슈퍼 캐패시터의 경우는 일반적으로 정격전압의 1/2까지 사용하기 때문에 슈퍼캐패시터의 총 에너지 저장량 ($E = \frac{1}{2} CV^2$)의 3/4까지 사용할 수 있도록 설계된다. 맥스웰 캐패시터(48.6V/165F : BMOD0165 E 48 A) 모델로 선정시 한 모듈의 에너지 저장량은

$$E = \frac{1}{2} CV^2 = \frac{1}{2} \times 165 \times (48.6 - 24.3)^2 = 48,716 [J] = 13.5 [Wh]$$

와 같이 계산될 수 있다. 또한 가선 전압 기준 강압전압 레벨은 표를 기준으로 DC 1,000V로 강압한다. 이 조건에 따라서, 1직렬 결선시 에너지량을 산출하면,

$$: 48.6V \times 21 \text{ Modules} = 1020.6 [V]$$

$$: 48,716 [J] \times 21 \text{ Modules} = 1.023 [MJ] =$$

284 [Wh] 와 같다.

따라서, 맥스웰 슈퍼 캐패시터 기준 21 직렬, 3 병렬로 결선하여 63개의 모듈이 사용될 수 있다.

4. 결 론

전 세계적으로 에너지의 보전과 재활용의 방안 및 새로운 에너지의 개발을 위한 여러 가지 연구들이 진행되고 있다. 에너지 재활용의 방안 중에서도 소모성의 에너지를 저장하는 기술의 발전이 가장 핵심이 된다고 할 수 있다. 따라서 에너지저장장치를 우리나라 도시철도시스템에 적용하기 위해 2호선의 낙성대, 신림, 서초변전소에 대해서 회생에너지를 측정하였으며, 이를 분석하여 이에 적합한 에너지저장장치의 용량을 계산하였다. 측정방법 및 용량계산 방법은 향후 도시철도에 설치하고자 할 때 적용될 수 있을 것이다.

References

- [1] 2002. 11. 초전도를 이용한 중소형 전력저장 장치에 관한 보고서, 한국전기연구원,
- [2] Supercapacitor 의 특성 및 응용, 한국전기연구소 전지연구그룹 보고
- [3] 2004.6. 에너지 절약 기술동향, 제 31호
- [4] 2005.2. 전력저장기술의 최근의 동향, 철도와 전기기술 VOL.16 No.2,
- [5] 2002.4. 초전도 에너지저장 시스템 기술개발 동향, 전력전자학회지 제7권 제2호,
- [6] 2004. Contact-wire-less Tramcar using Rechargeable Lithium Ion Battery, Japanese Railway Engineering no.152,
- [7] 전력리사이클차량 - 가선과 충전지의 하이브리드형 전차, 철도의 미래를 향한 연구개발, RRR 2005.7
- [8] 전전기브레이크의 기술동향, 철도차량과 기술 No.74
- [9] 회생 브레이크와 에너지, 철도차량과 기술 No.78