

# 교류전기철도에서의 에너지저장시스템 적용효과 예측

## Estimation about Application Effects of Energy Storage System at AC Electric Railway

이장무†                      이한민\*                      김길동\*\*  
Chang-Mu Lee              Han-Min Lee              Gil-Dong Kim

---

### ABSTRACT

Energy Storage System(ESS) is installed at feeding line of railway substation. ESS will absorb regenerative energy when train braking and also charge electric energy when feeding line is no load condition. Absorbed and charged energy will be supplied when train is accelerating condition. Due to ESS the energy variation will be minimized and this effect is estimated.

---

#### 1. 서론

2004년 고속철도의 도입으로 장거리 여객운송에 혁신을 가져왔다. 이러한 장거리 운송의 핵심이 되는 KTX고속열차는 15MW 대용량의 부하로 열차의 출발과 제동시 급격한 부하변동을 유발시킨다. KTX 고속열차가 운행하는 고속선에 전력을 공급하는 고속철도 전철변전소에서는 열차의 운행상태에 따라서 급격한 부하의 변동이 나타난다. 즉, 급전선로에 열차가 없거나 타행운전일 경우 무부하에 가까운 부하조건에서 고속열차가 출발할 경우 15MW 이상의 견인부하를 공급하여야 하며, 열차가 정지할 경우 10MW이상의 회생부하가 변전소로 유입되기도 한다. 아울러 이러한 출발과 정지가 복합적으로 합성될 경우 부하의 변화는 매우 커지게 된다.

본 연구에서는 전철변전소 급전구간에 에너지저장시스템을 설치하여 고속열차 제동시 발생하는 에너지를 흡수하고 무부하시 에너지를 충전하여 고속열차 견인시 필요한 에너지를 공급하여 변전소에서 공급하는 부하의 변화를 최소화 할 수 있도록 하여, 그 효과를 검토하고자 한다.

#### 2. 본론

##### 2.1 에너지저장시스템

###### 2.1.1 직류구간

직류전기철도시스템은 22.9kV 3상전원을 수전받아 Y- $\Delta$  변압기 및 정류기를 통하여 DC1500V를 생성하여 전기차량에 공급한다. 전기차량은 직류전철변전소로부터 기동 및 견인에 필요한 전력을 공급받아 전동기를 구동하며, 제동시 차량은 발전기가 되어 전력을 발생하여 전차선로에 전력 즉 회생에너지를 공급한다. 공급된 회생에너지는 주변에 있는 역행전동차에 공급하여 사용되며, 남은 회생에너지는 전

---

† 책임저자 : 정회원, 한국철도기술연구원 차세대전동차연구단 선임연구원  
E-mail : cmlee@krti.re.kr  
TEL : (031)460-5421 FAX : (031)460-5809

\* 정회원 한국철도기술연구원, 차세대전동차연구단, 선임연구원

\*\* 정회원 한국철도기술연구원, 차세대전동차연구단, 책임연구원

력계통으로 공급되지 않고 차량내의 저항기 또는 전차선의 저항에 의해 열로서 사라지게 된다. 직류구간에서는 소비에너지의 45%정도에 해당하는 회생에너지가 발생하는데 이중 10~15%정도만 주변전동차 소비에너지로 활용되고 25~30%는 전차선에 열로서 사라진다.

따라서 직류구간에서의 에너지저장시스템은 전동차 제동시 발생한 회생에너지를 에너지저장시스템에 저장하고, 저장된 에너지를 전동차 역행시에 전동차에 공급하여 전동차 운행 중 발생하는 에너지를 재활용하는 시스템이다. 즉, 에너지저장시스템은 변전소의 모선에 연결되어 그림 1과 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.

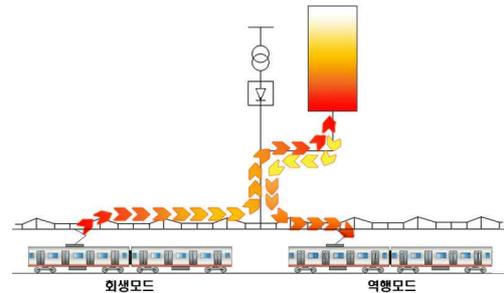


그림 1. 회생 에너지 저장 및 공급

### 2.1.2 교류구간

교류전기철도시스템은 154kV 3상전원을 수전받아 스코트변압기를 통하여 AC55kVx2상을 생성하여 전기차량에 전력을 공급한다. 전기차량은 직류시스템과 마찬가지로 전력을 공급받아 차량을 견인하며, 제동시 회생에너지를 발생시킨다. 이때 발생한 회생에너지는 같은 계통상에 있는 견인하는 전기차량에 전력을 공급하며, 남은 회생에너지는 변압기를 통하여 전력계통으로 공급되어진다. 직류전기철도시스템과 다르게 교류전기철도시스템에서는 잉여분의 회생에너지는 열로서 소모되는 것이 아니라 전력계통으로 공급되어 재활용되는 것으로 볼수 있으나, 철도급전계통에서는 잉여회생에너지에 전력요금에 반영되지 못함으로 낭비되고 있다고 볼수 있다. 따라서 이러한 잉여회생에너지를 저장하여 부하집중에 따른 전차선 전압강하시 재활용하여 철도급전계통의 부하를 안정화 시킬 필요가 있다.

현재 운행 중인 교류25kVx2전기철도구간에서 열차의 운행에 따른 전압강하 보상 및 에너지 절감 등을 목적으로 에너지저장시스템이 고속철도운행구간에 시범설치 중에 있다.

### 2.2 교류전기철도시스템에서의 에너지저장시스템 적용효과 예측

에너지저장시스템의 적용효과를 고속철도가 운행하는 교류전기철도시스템에 대하여 예측하였다. 시물레이션 대상 변전소로 고속철도2단계사업으로 건설중인 변전소의 한 구간을 선정하였으며 고속열차는 6.5분 시격으로 운행하는 것으로 하였다. 또한 에너지 충방전 용량이 충분한 경우와 부족한 경우로 나누어 시물레이션을 수행하였으며, 저장시스템의 에너지 변환 및 저장 손실은 없는 것으로 가정하였다.

- 철도급전계통 입력데이터
  - 한국전력계통임피던스  $\%Z = 0.1 + j1.943$  [100MVA기준]
  - 송전선로 임피던스  $\%Z = 0.2458 + j0.9644$
  - 스코트변압기 :  $\%Z10$ , 60MVA, X/R=23
  - 급전거리 : 22.7km(SS-PP-SP)
- 에너지저장시스템
  - 에너지저장용량 : 0.5[MWh] / 1 [MWh]
  - 초당 충방전에너지 : 15 [MW]/sec
  - 초기충전에너지 : 0.25[MWh] / 0.5 [MWh]
  - 충전전압 : 27.5 [kV]
  - 방전전압 : 24.25 [kV]

아래 표1과 그림2에 에너지저장시스템 설치에 따른 시물레이션 결과를 나타내었다.

표 1. 시뮬레이션 결과 요약

| 에너지저장장치 용량       |    | 에너지저장장치 용량 |           |           |
|------------------|----|------------|-----------|-----------|
|                  |    | 없음         | 0.5 [MWh] | 1.0 [MWh] |
| 변전소 공급전압<br>[kV] | 최소 | 47.93      | 49.67     | 50.65     |
|                  | 최대 | 56.17      | 56.09     | 55.60     |
| 선로 말단전압<br>[kV]  | 최소 | 21.09      | 24.07     | 24.08     |
|                  | 최대 | 28.77      | 28.55     | 27.61     |
| 차량 집전전압<br>[kV]  | 최소 | 18.34      | 22.29     | 22.29     |
|                  | 최대 | 28.83      | 28.50     | 27.61     |
| 변전소 공급전류<br>[A]  | 최소 | -289.2     | -196.4    | -39.6     |
|                  | 최대 | 1,035.8    | 1,000.8   | 755.0     |
| 변전소 공급부하<br>[MW] | 최소 | -15.47     | -10.00    | -1.55     |
|                  | 최대 | 47.41      | 47.41     | 37.13     |

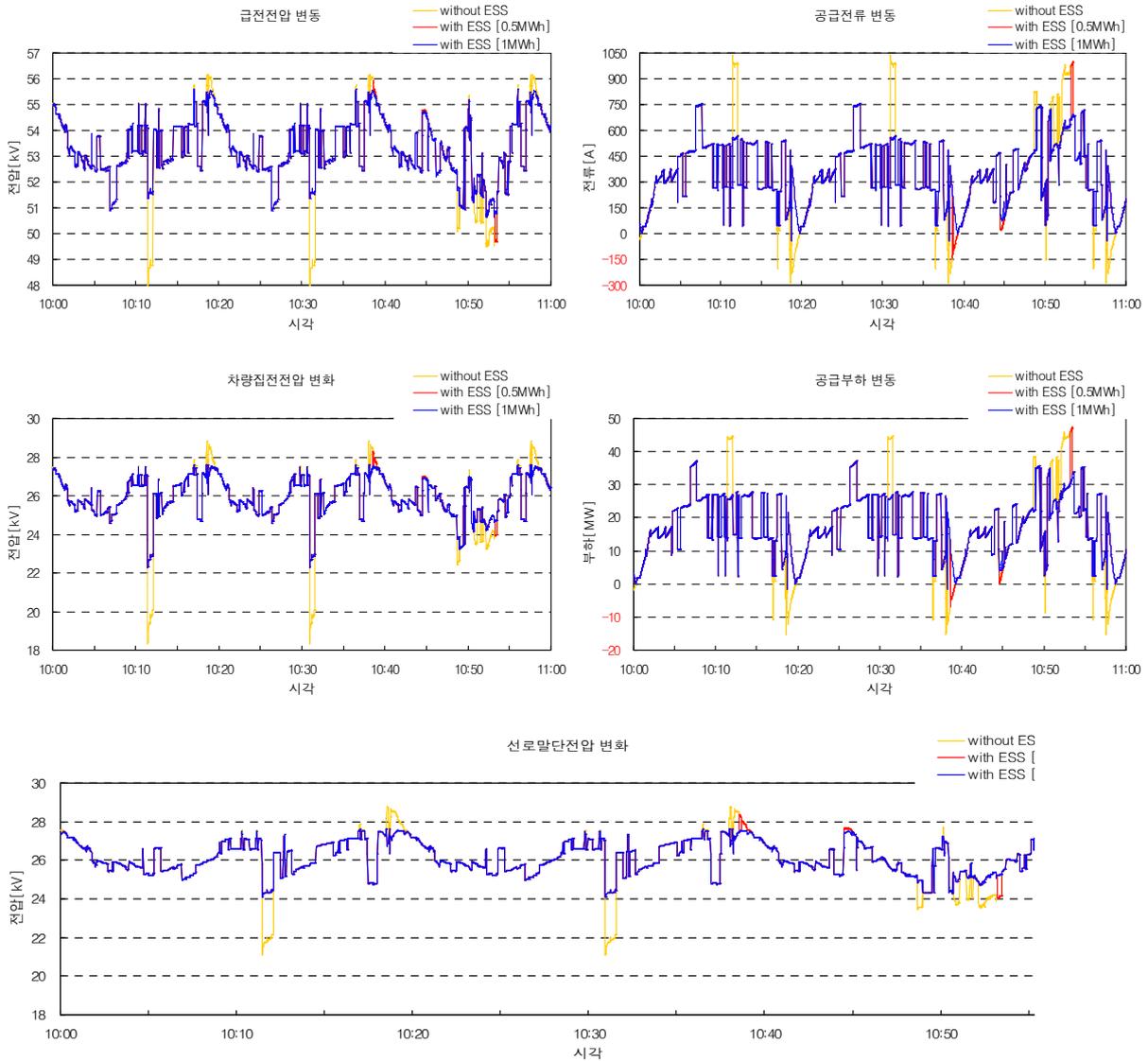


그림 2. 에너지저장시스템 설치효과 시뮬레이션 결과

에너지저장장치를 설치하지 않을 경우 변전소에서 공급하는 전압은 정격전압 55[kV]의 87.14%인

47.93[kV]까지 하강하고 전류는 순시최대 1,035[A], 부하는 순시최대 47.41[MW]를 공급하는 것으로 나타났다. 이때 차량의 최저전압은 18.34[kV]로 고속열차 운전가능 하한전압인 19[kV] 이하가 되어 열차의 안전운행에 지장을 초래할 우려가 있다.

고속철도변전소 급전구간 말단에 0.5[MWh]용량의 에너지저장장치를 설치할 경우, 변전소의 공급최저전압은 47.93[kV]에서 49.67[kV]로 1.74[kV]가 상승하며, 1.0[MWh]용량의 에너지저장장치를 설치할 경우에는 50.65[kV]로 변전소 공급측에서의 최저전압이 2.72[kV] 상승하는 것으로 나타났다. 이를 좀더 세부적으로 살펴보면 그림3.㉓의 경우는 미설치시 47.93[kV]였던 전압이 저장장치를 설치함으로써 51[kV]이상으로 상승하였다. 이는 그림4.㉓와 같이 저장장치에서 충분한 에너지를 공급하여 전압상승이 이루어졌다고 볼수 있다. 그림3.㉔의 경우는 선로상의 차량이 회생을 하여 급전전압이 상승한 경우로 그림4.㉔와 같이 저장장치의 용량이 1.0[MWh]인 경우 회생에너지를 충분히 흡수하여 저장장치에 저장하여 급전전압의 상승을 억제하나, 저장용량이 0.5[MWh]인 경우는 회생에너지를 흡수하여 저장장치에 저장하는 도중에 저장장치가 만충되어 더 이상 충전할 수가 없는 상태로 회생에너지 충전중에는 급전전압 상승이 억제되나 충전할수 없는 경우에 급전전압이 다시 상승함을 보여주고 있다. 그림3.㉕는 전압강하로 에너지저장장치에서 선로에 전력을 공급하는 경우로 그림4.㉕와 같이 0.5[MWh]용량의 저장장치는 저장된 에너지를 선로에 공급하는 도중 저장된 용량을 다 소모하여 전압보상이 완벽하게 이루어지지 않는 경우이며, 1.0[MWh]용량의 저장장치는 저장된 용량이 충분하여 2.72[kV]이상의 전압보상을 수행함을 보여주고 있다.



그림 3. 급전전압변동 세부도

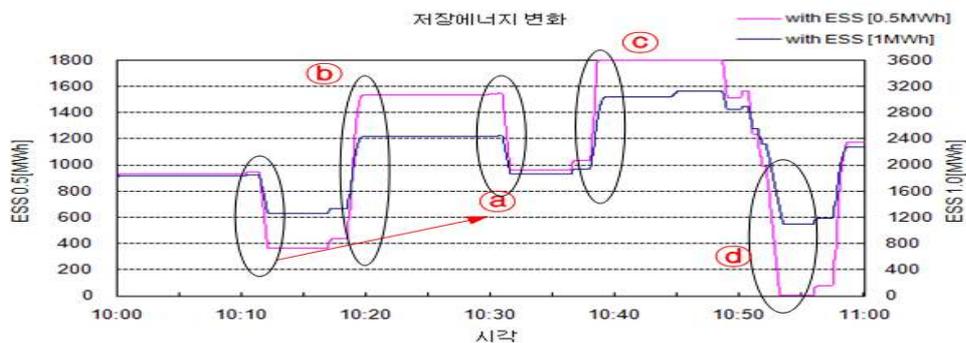


그림 4. 에너지저장장치의 에너지 변화

변전소에서 공급하는 순시최대부하전류 또한 미설치시 1,035[A]에서 0.5[MWh] 설치시 1,000[A] 1.0[MWh] 설치시 755[A]로 각각 35[A] 및 281[A]가 감소되는 것으로 나타났다.

변전소에서 공급하는 순시최대부하 역시 미설치시 47.41[MW]에서 1.0 [MWh]설치시 37.13[MW]로 10.29[MW]가 감소되는 것으로 나타났으나, 0.5[MWh] 설치시는 순시최대부하가 미설치시와 동일한 것으로 나타났다. 그림5.㉓의 경우는 고속열차가 회생전력을 변전소로 보내는 상황으로 그림4.㉔와 같이 ESS에서 회생된 에너지를 전량 저장하고 있다. 그림5.㉔의 경우는 그림4.㉔와 같이 회생된 에너지를

0.5[MWh]용량의 ESS에서 저장하는 도중에 저장용량이 가득차게 되어 더 이상 회생전력을 저장하지 못하는 상황이며, 1.0[MWh]용량의 ESS는 저장용량이 충분함으로 회생된 에너지를 전량 저장하고 있는 상황을 보여주고 있다. 그림5.㉔는 급전선로상의 부하가 매우 커 말단 전압이 ESS의 방전전압 이하가 되어 저장된 에너지가 공급되는 상황으로 그림4.㉑와 같이 15[MW]의 부하를 ESS 공급하고 있는 것으로 0.5[MWh] ESS는 부하보상에 필요한 충분한 에너지를 보유하고 있지 않아 완전한 부하보상을 이루지 못하고 있음을 보여주고 있으나, 1.0[MWh] ESS는 저장된 에너지가 충분하여 필요한 부하보상을 충분히 하고 있음을 보여준다.

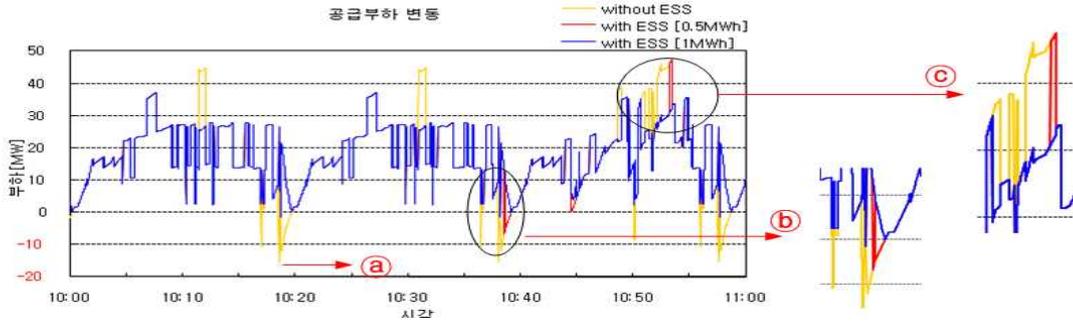


그림 5. 공급부하변동 세부도

차량의 집전전압은 미설치시 18.34[kV]에서 22.29[kV]로 3.95[kV]가 상승하여 정상적인 열차운행이 가능한 것으로 나타났다.

다음 표2.는 ESS를 설치함에 따라 변전소의 에너지 저감정도를 정리한 것이다. 철도변전소의 전력요금 산정에 기준이 되는 15분최대부하는 미설치시 22,060[kW]에서 ESS를 설치함으로써 20,850[kW]로 1,210[kW]가 감소하는 것으로 나타났다. 이를 전력요금으로 산정하면 다음과 같다. 대부분의 철도변전소는 한국전력 전력요금체계에서 산업용(갑)-II 요금체계를 사용하고 있으므로 저감되는 전력 기본요금을 계산하면 연간 71,293,200원을 절약할 수 있다. 따라서 철도변전소 1개소당 0.7억원X2=1.4억원의 요금을 절감할 수 있다.

$$\begin{aligned} \text{전력요금 계산} &: \text{저감전력량[kW]} \times \text{kW당 단가} \times \text{기간} \\ &= 1,210[\text{kW}] \times 4,910\text{원}/[\text{kW}] \times 12\text{월} = 71,293,200\text{원} \end{aligned}$$

표 2. 부하 및 충방전 에너지 누계

| 항목                |    | 에너지저장장치 용량 |           |           |
|-------------------|----|------------|-----------|-----------|
|                   |    | 없음         | 0.5 [MWh] | 1.0 [MWh] |
| 15분평균부하<br>[MW]   | 최소 | 13.43      | 13.76     | 14.28     |
|                   | 최대 | 22.06      | 20.85     | 20.85     |
| 저장/공급에너지<br>[MWh] | 저장 | -          | 1.750     | 2.053     |
|                   | 공급 | -          | 1.675     | 1.800     |

### 3. 결론

전 세계적인 녹색성장 정책에 따라 탄소배출억제 및 에너지절약은 매우 중요한 흐름이 되었다. 전기철도시스템에서 회생에너지의 재활용 및 가선전압 안정화를 위하여 에너지저장시스템을 개발하여 그 적용가능성을 검토하고 있는 중이며 직류 전기철도구간에서는 그 효과를 현장설치를 통하여 보이고 있다. 에너지저장시스템을 교류전기철도시스템에 설치할 경우에 대한 그 효과를 시뮬레이션을 통하여 보였으며 그 결과는 다음과 같다.

- 에너지저장장치를 설치함으로 변전소 급전전압, 선로말단전압, 차량집전전압이 증가하였으며 변전소 공급전류 및 부하가 감소함을 보였다.
- 선로말단전압과 차량집전전압은 에너지저장장치의 용량변화에도 큰 변화가 없는 것으로 나타났으나, 이는 최저전압 순간의 보상에 필요한 저장장치의 용량이 충분한 것으로 판단된다.
- 변전소 공급부하 순시최대값은 에너지저장장치가 없는 경우나 0.5[MWh] 저장장치를 설치한 경우나 동일한 것으로 나타났다. 이는 시뮬레이션에서 적용된 0.5[MWh]용량은 지속적인 부하공급 조건에서 용량이 부족한 것으로 판단된다.
- 전력요금산정의 기본이 되는 15분최대전력이 저감되어 변전소당 연간 1.4억원의 기본요금이 절감되는 것으로 기대된다.

### 참고문헌

1. 이장무, “에너지저장시스템을 활용한 교류전기철도 피크전력 저감검토”, 한국철도학회추계학술대회, 2009.
2. 이한민, “전기철도시스템에 에너지저장시스템 적용해석에 관한 연구”, 대한전기학회 추계학술대회, 2009
3. 이한민 “도시철도시스템을 위한 전기이중층 캐패시터 적용에 관한 연구”, 대한전자공학회 하계학술대회 논문집, 제29권 제1호, pp. 901-902, 2006
3. 김길동, “도시철도 회생 에너지저장시스템 설치 및 시험”, 대한전기학회 전력계통연구회 춘계학술대회 논문집, pp. 172-174, 2008
4. Hanmin Lee, Gildong Kim, Changmu Lee, "Development of ESS for Regenerative Energy of Electric Vehicle", WCRR, pp. 476-478, 2008
5. Hanmin Lee, Gildong Kim, Sehchan Oh, Wootae Jeong, "A Study on Effects of Energy Saving by applying Energy Storage System", ICEE No.P-202, pp. 1-5, 2008
6. Hanmin Lee, Gildong Kim, Changmu Lee, "Analysis for EDLC Application on Electric Railway System", PCC nagoya, pp. 226-229, 2007
7. 이한민, 오광해, 이장무, 창상훈, “5도체군 등가모델을 이용한 선로정수 예측에 관한 연구”, 대한전기학회 춘계학술대회 논문집, pp.443 ~ 445, 2001
8. 이한민, 김길동, 이장무, “도시철도시스템용 에너지저장시스템 용량설계에 관한 연구”, 한국신재생에너지학회 추계학술대회, 2007
9. 한국철도기술연구원, “에너지저장시스템 기술개발 3차년도 보고서”, 2008
10. 한국철도기술연구원, “에너지저장시스템 기술개발 4차년도 보고서”, 2009