

에너지저장시스템과 도시철도 차량의 상관관계에 관한 연구

Study for the Relations between Electric Multiple Unit and Energy Storage System

이희선† 백승길* 권경민** 김길동***
Heui-Seon Lee Seoung-Gil Baek Kyoung-Min Kwon Gil-Dong Kim

ABSTRACT

This paper is about the relations between the electric multiple unit and ESS(Energy Storage system, here after) applying bi-direction Buck-Boost Converter. ESS may be possible to suppress the line voltage drops and the power loading fluctuations and to save the regeneration power lapses.

This paper confirm for simulation that ESS reusing regenerative power generated during braking in train. Also, presents the influence of regenerative power variation of train and catenary acceptability for energy saving obtained by applying the ESS to Daejeon Metro line 1.

1. 서론

전 세계적으로 석유자원의 고갈과 온실가스 감축을 위한 신재생에너지의 보급 확대, 스마트그리드와 같은 미래 전력망은 에너지 저장시스템의 급속한 성장을 예고하고 있으며, 특히 신재생에너지의 보급과 함께 스마트 그리드의 핵심으로 전기전력의 저장 및 품질, 그리고 에너지 사용의 효율화를 극대화 시킬 수 있는 에너지저장시스템에 대한 관심과 기술개발이 선진국을 중심으로 빠르게 진행되고 있는 상황이다. 현재 정부에서는 2020년까지 BAU(Business As Usual) 30[%] 온실가스 감축을 목표로 제시하고 있다.

직류 도시철도 시스템에서 회생에너지 저장시스템은 가선전압의 안정화 및 에너지 효율을 높일 수 있는 방법으로써 저탄소 녹색성장에 따른 에너지 절감과 지구 온난화 방지를 위하여 최근 각광받고 있는 분야이다. 에너지저장시스템은 도시철도 운행전동차의 제동시 발생하여 허공으로 사라지는 회생에너지를 낭비하지 않고 에너지 저장매체에 저장한 후, 차량 운행(역행)시 재사용하는 시스템으로 전력에너지 사용량 절감과 CO₂배출가스 저감효과, 환경 친화적이고 효율적인 전력 활용에 이바지 할 수 있으며 회생실효방지 및 에너지 절약에 크게 기여할 수 있다. 국외의 선진국에서는 회생에너지의 활용을 위한 여러 가지의 방법과 에너지저장방식에 관한 연구가 활발히 진행되고 있는 실정이며, 최근 국내 도시철도 운영기관은 에너지 절감을 위한 방안으로 에너지저장시스템 도입을 위한 현장 실측 및 전력 시뮬레이션을 통한 연구를 진행하고 있다.

본 논문에서는 도시철도 차량에서 제동 시 발생하는 회생전력을 재활용하기 위한 에너지저장시스템을 시뮬레이션을 통하여 확인하고 대전도시철도 변전소에 시스템을 설치 후 에너지저장시스템이 급전시스템에 미치는 영향과 차량의 회생에너지 증감량 및 가선수용성에 미치는 영향에 대하여 연구하였다.

† 대전도시철도공사, 차량팀장
E-mail : tcms007@yahoo.co.kr

* 대전도시철도공사, 차량팀

** 우진산전, 전장개발팀

*** 한국철도기술연구원, 차세대전동차 사업단

2. 에너지저장시스템의 구성

2.1 양방향 DC-DC 컨버터의 구성

에너지저장 시스템의 장치 구성은 그림 1.에서 보는 것과 같이 양방향 DC-DC 컨버터를 적용하여 Duty ratio에 따라 양방향으로 에너지를 충, 방전할 수 있도록 구성하였다. 시스템 구성은 DC1500[V] 모선과 에너지저장시스템간 인터페이스를 위한 단로기 및 차단기와 충전부로 구성된 가선 입력부, 가선 전원의 평활화를 위한 L-C 필터부, 양방향 DC-DC컨버터로 구성된 전력 변환부 그리고 회생에너지를 충, 방전하기 위한 에너지 저장부로 구성되어진다. 또한, SCADA와 연계하여 에너지저장시스템의 상태 감시를 위한 원격감시시스템 및 원격소장장치(RTU)를 통한 원격제어시스템으로 구성되어진다.

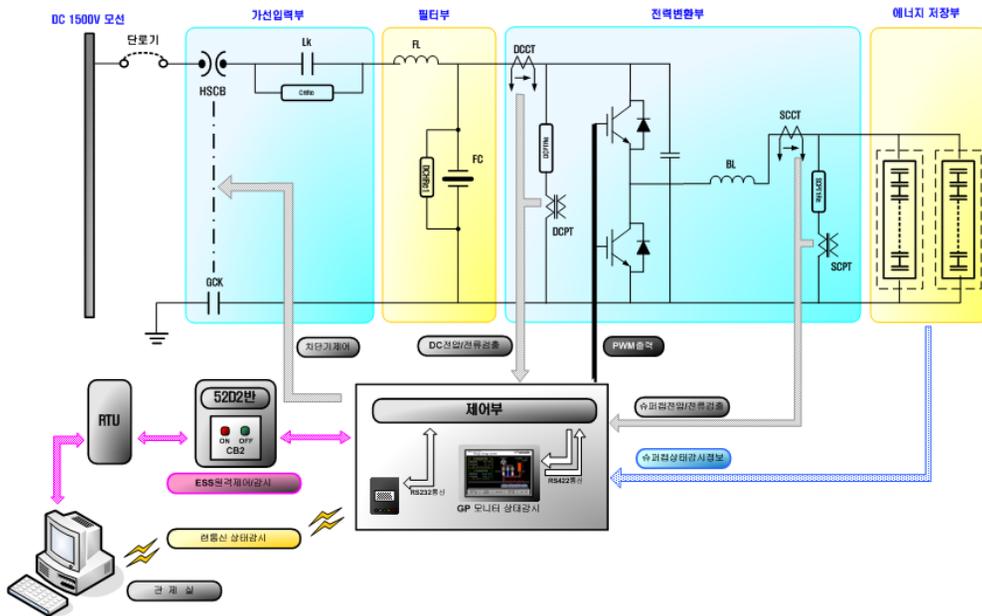


그림 1. 에너지저장시스템 구성도

2.2 시스템 제어기구성

에너지저장 시스템의 제어기는 초기 슈퍼캐패시터의 정전류 충전을 위한 초기충전 제어기와 초기 충전완료 후 열차의 역행, 제동 시 발생하는 회생 에너지를 이용하여 가선전원을 안정화시키기 위한 전력 제어기로 구성하였으며, 각 제어기의 구조는 PI-PI의 2중 루프 제어기로 설계 하였다.

2.2.1 초기 충전제어기

초기 충전제어기는 초기 슈퍼캐시터를 충전하기 위한 제어기로 슈퍼캐패시터가 완전 방전되었을 때에 dv/dt 성분에 의한 돌입전류를 방지할 위한 소프트 스타트 제어기와 정전류 제어를 위한 전류제어기 그리고 전류제어기의 출력 값에 따른 Duty ration를 제어하기 위한 전압제어기로 구성된다. 실제 소프트 스타트에 의한 제어기는 컨버터 스타트 후 1.2[sec]동안 제어를 하고 나머지 부분은 정전류 제어를 위한 이중루프 제어기에 의해 출력된다.

양방향 DC-DC컨버터에 의해 계산되어진 시스템 전달함수 $G(s)$ 를 계산하면 식(1)로 표현 할 수 있다.

$$G(s) = \frac{I_{sc}(s)}{V_{BL}(s)} = \frac{1}{sL_{BL}} \quad (1)$$

계산된 시스템 전달함수로부터 페루프 전달함수 $H(s)$ 를 계산하면 식(2)과 같이 유도되어진다.

$$H(s) = \frac{PI_{cc}(s)G(s)}{1 + PI_{cc}(s)G(s)} = \frac{K_{Ip}s + K_{Ii}}{L_{BL}s^2 + K_{Ip}s + K_{Ii}} \quad (2)$$

2차 계통의 페루프 전달함수인 식(2)와 2차 원형계통의 전달함수로부터 전류제어기의 이득을 계산하면 식(3)과 같이 계산되어진다.

$$\begin{cases} K_{Ip} = 2\xi\omega_n L_{BL} \\ K_{Ii} = \omega_n^2 L_{BL} \end{cases} \quad (3)$$

여기서 ξ 는 2차 원형계통의 댐핑 계수로 0.707로 설정하였고 ω_n 은 전류제어기의 절점주파수로 내부루프인 전압제어기를 고려하여 100[Hz]로 선정하였다.

내부루프인 전압제어기에 있어서 시스템 전달함수 $G(s)$ 는 슈퍼캐패시터로 흐르는 전류 방정식으로부터 식(4)와 같이 표현할 수 있다.

$$G(s) = \frac{V_{sc}(s)}{I_{sc}(s)} = \frac{1}{sC_{sc}} \quad (4)$$

계산된 시스템 전달함수로부터 페루프 전달함수 $H(s)$ 를 계산하면 식(5)와 같이 유도되어진다.

$$H(s) = \frac{PI_{vc}(s)G(s)}{1 + PI_{vc}(s)G(s)} = \frac{K_{Vp}s + K_{Vi}}{C_{sc}s^2 + K_{Vp}s + K_{Vi}} \quad (5)$$

전압제어기의 이득선정도 전류제어기와 같은 방법으로 2차 원형계통의 전달함수로부터 식 (6)과 같이 계산할 수 있다.

$$\begin{cases} K_{Vp} = 2\xi\omega_n C_{sc} \\ K_{Vi} = \omega_n^2 C_{sc} \end{cases} \quad (6)$$

현 시스템에서는 외부루프인 전류제어기의 응답속도와 스위칭 주파수를 고려하여 절점주파수를 1[kHz]로 선정하였다.

2.2.2 전력모드 제어기

그림 2.는 시험에 적용한 전력모드 제어기를 간략화한 구성도이다. 전력모드 시 내부 루프인 전류제어기는 초기충전모드일 때와 달리 내부루프에 위치하게 되어 외부루프인 전력제어기의 절점주파수보다 빠른 절점주파수를 가지게 된다.

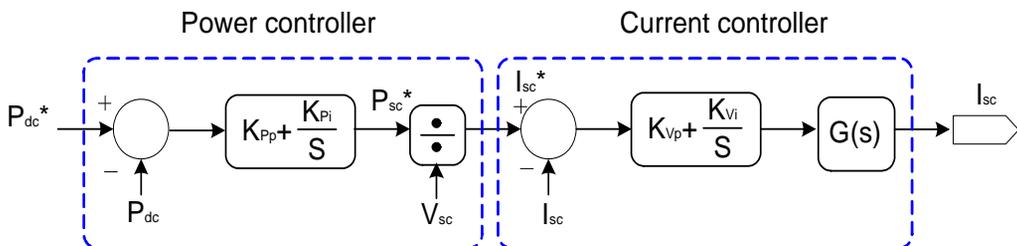


그림 2. 전력모드 제어기 구성

전력모드에서 외부루프인 전력제어기는 DC링크단의 전력을 제어하는 것으로 DC링크단의 임피던스는 추종값과 실제값이 항상 같게 됨으로 결국 V_{dc}^2 에 의한 에러값을 보상하는 결과와 동일하게 계산되어진다.

전류제어기에 있어서 시스템 전달함수 $G(s)$ 는 식(7)의 관계에 의해 식(8)과 같은 시스템 전달함수로 계산된다.

$$P_{dc} \simeq P_{sc} = \frac{1}{2} C_{sc} V_{sc}^2 = V_{sc} I_{sc} \quad (7)$$

$$G(s) = \frac{P_{dc}(s)}{I_{sc}(s)} = V_{sc}(s) = \frac{1}{s C_{sc}} \quad (8)$$

3. 에너지저장시스템과 도시철도 시스템과의 상관관계

3.1 변전소 시스템구성

직류 전철 변전소의 급전시스템은 한전으로부터 공급받은 전기를 변압기를 통하여 강압 후 2,500[kW] 12펄스 정류기로 구성되어 모선에 DC 1500[V]를 공급하도록 되어 있다. 그림 3.은 대전도시철도공사 1호선 변전시스템구성 및 에너지저장시스템의 설치위치를 나타낸다. 그림에서 알 수 있듯이 본선 5개 변전소 중 에너지저장시스템(ESS)은 3개소에 설치되어 있다.

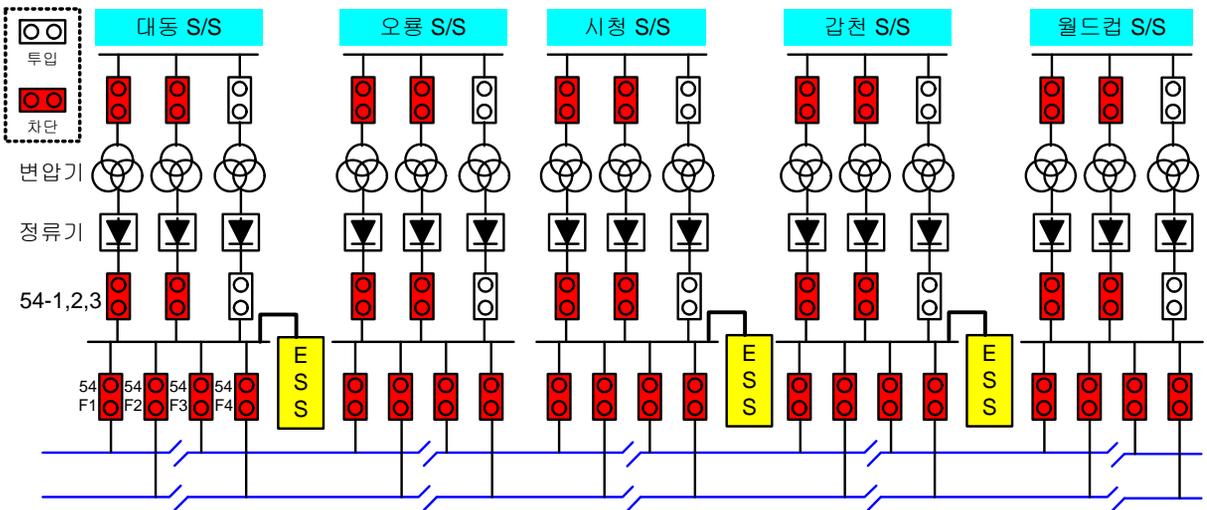


그림 3. 대전도시철도공사 1호선 본선 급전시스템 구성도

3.2 도시철도 차량의 회생량 및 가선수용성 증가

한전에서의 공급전원 변동은 ±3[%]까지 허용이 되고, 실제 측정결과 정류기 후단의 가선전압의 변동 폭은 무부하시 1640[V]이며, 본선에 차량 투입 시 1625[V]를 기준으로 1612~1640[V]범위까지 변동이 되었다. 그리고, 차량의 역행, 제동 시에 가선전원은 1580[V]~1850[V]까지 변동된다.

에너지저장시스템을 직류 모선에 연결하여 차량이 제동 시에 나타나는 회생에너지로 인하여 가선전압이 상승할 경우, 컨버터가 동작하여 잉여에너지를 저장하고 차량이 역행 시 저장된 에너지를 방전하도록 구성함으로써, 가선전원의 안정화를 도모할 수 있다. 또한, 차량의 VVVF인버터는 실시간으로 가선전압을 감시하다가 FC전압이 1750[V]이상이 되면, 제동 시에 회생을 차단하도록 구성되어 있다. 따라서, 에너지저장시스템이 동작할 경우, 가선전원의 안정화로 인하여 도시철도 차량은 전기제동을 Fade out시점까지 충분히 사용할 수 있게 되며, 차량의 회생에너지량은 증가하게 되어 가선의 수용성도 좋아지게 된다.

3.3 정위치 정차율 향상

ATO 장치는 정위치정차를 수행하기 위해 현재 운행하는 궤도에 대한 거리정보를 통해 남아있는 거리를 산출하고 정차점까지의 남은 거리에 맞는 속도 제어를 위해 열차종합제어장치(TCMS)에 제동 명

령을 지령하여 열차의 감속도를 제어한다. 감속도 $b(m/s^2)$ 인 열차가 1지점에서 2지점으로 운행할때 감속도 계산시 평균속도는 식(9)와 같이 계산되어진다.

$$V_{avg} = (V_1 + V_2)/2 \quad [m/s] \quad (9)$$

속도 V_1 에서 V_2 까지의 감속시간은 $(V_1 - V_2)/b$ 로 되며, A지점에서 B지점까지의 거리(D) = 속도×시간으로 식(10)과 같이 계산되며, 이때, 차량 감속도(b)는 식(11)과 같이 나타낼 수 있다.

$$D = \{(V_1 + V_2)/2\} * \{(V_1 - V_2)/b\} \quad (10)$$

$$b = (V_1^2 - V_2^2)/2D \quad (11)$$

열차의 제동거리는 TCMS에서 지령한 제동명령이 전송된 후 정차할 때까지의 시간동안 열차가 진행한 거리를 말하며 공주거리와 실제동거리로 나누어 생각해 볼 수 있다.

열차의 제동거리(S)는 식(12)로 나타낼 수 있다.

$$S = S_1 + S_2 = \frac{V}{3.6}t_n + \frac{4.17 WV^2}{B + W(R_R + R_G + R_C)} \quad (12)$$

단, S_1 : 공주거리, S_2 : 실제동거리 B : 제동력, R_R : 주행 저항
 R_G : 구배 저항, R_C : 곡선 저항 W : 중량 V : 속도

도시철도차량이 역사에 진입하여 열차속도가 15[km/h]가 되면, M-car에서는 회생제동과 공기제동을 동시에 사용하는 블랜딩제어를 시작하여 열차속도가 5[km/h]가 되면 VVVF는 Fade-out되고 순수 공기제동으로 전환하여 정위치 정차를 하게 된다.

그러나, 블랜딩제어 중 회생에너지로 인한 가선전압이 1750[V]이상 상승할 경우, VVVF는 회생을 차단시키게 되며, TCMS는 공기제동력을 더 요구하게 된다. 이때, 필요한 공기 제동력은 기계 제동으로 응답 지연이 발생되어 공주거리가 길어지게 되고 결국 정위치 정차의 오차범위를 벗어나는 결과를 초래한다. 에너지저장시스템의 유,무에 따른 가선전원의 안정화 및 회생수용성 증가는 VVVF 인버터를 통한 전기제동을 충분히 사용할 수 있도록 동작시키며, 정위치 정차를 향상에 영향을 미치게 된다.

4. 시뮬레이션 및 시험

4.1 시뮬레이션

그림 4.는 에너지저장시스템의 시뮬레이션 구성도를 나타낸다. 가선전원은 3상 전파 정류한 1500[V]를 인가하였으며, 전력 변환부는 양방향 DC-DC컨버터로 구성하고 충,방전시 동작되는 Boost-reactor는 3.5[mH]로 구성하였다. 에너지저장매체는 슈퍼캐패시터를 모델링하여 시뮬레이션 하였다.

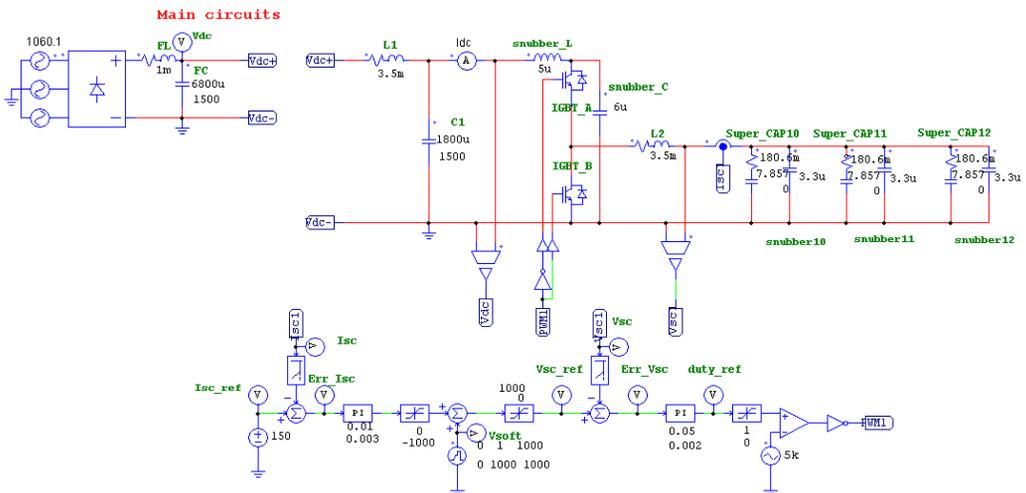


그림 4. 에너지저장시스템 시뮬레이션 구성도

그림 5.는 직류 1500[V] 모선에 에너지저장시스템을 V_dc로 연결하고 VVVF 인버터부하로 모터를 연결하여 전력모드로 수행한 시뮬레이션 구성도이다.

전력모드 시뮬레이션은 모터를 구동하여 1~5초동안 역행, 5~10초구간은 타행, 10~15구간은 제동으로 구성(wrpm_ref)하였다.

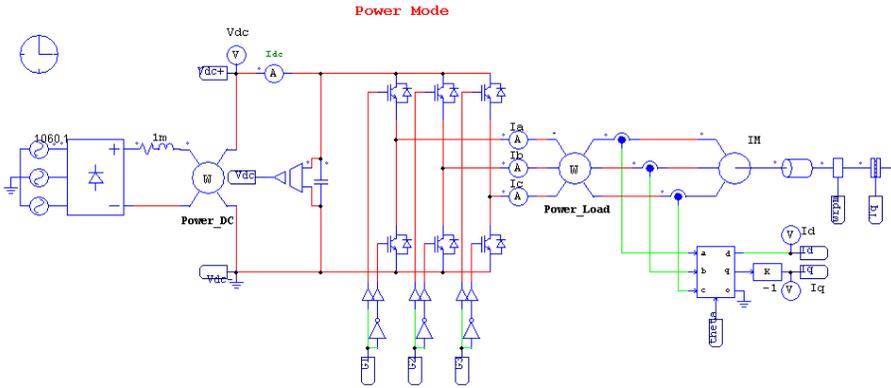


그림 5. 전력모드 시뮬레이션 구성도

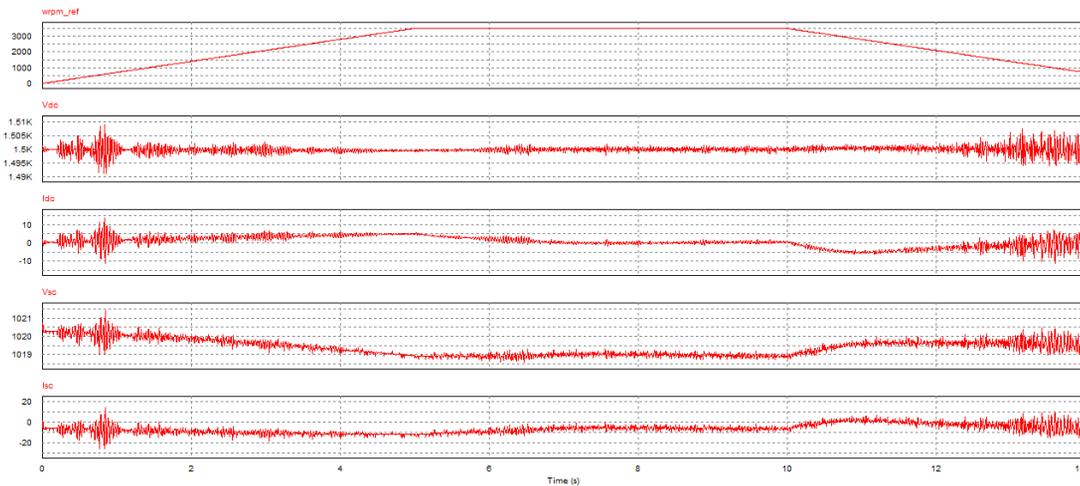


그림 6. 시뮬레이션 파형

그림 6. 시뮬레이션 파형에서 알 수 있듯이 가선전압은 역행구간동안 에너지저장시스템이 저장되어 있던 에너지(V_sc) 공급함에 따라 1500V를 안정적으로 유지하였으며, 제동구간에서는 유도전동기로부터 발생된 회생에너지를 저장(V_sc)함을 확인할 수 있다.

4.2 시험 파형

도표 1.은 시험에 적용한 에너지저장시스템의 총, 방전조건 및 슈퍼캐패시터의 총,방전 제한용량에 대하여 나타내며, 슈퍼캐패시터에 흘릴 수 있는 전류는 250[A]로 제한하였다.

도 표 1. 에너지저장시스템 총, 방전 조건

구 분	시험 조건
충전개시전압	1645[V]~1660[V]
방전개시전압	1615[V]~1624[V]
슈퍼캐패시터 과충전 제한전압	1050[V]
슈퍼캐패시터 과방전 제한전압	450[V]
슈퍼캐패시터 총,방전 전류제한	250[A]

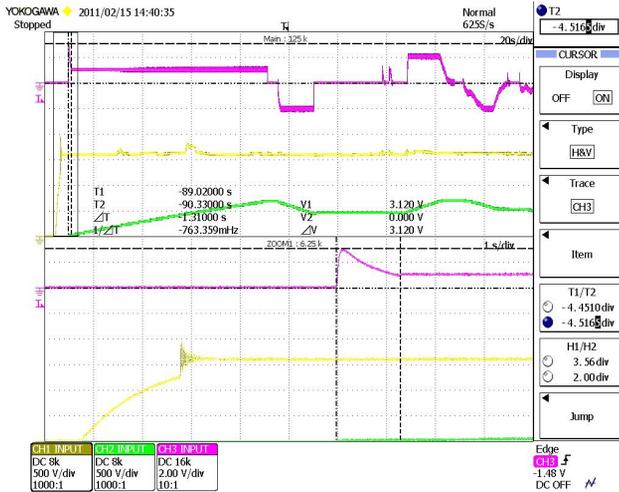


그림 7. 초기충전 및 전력모드시험파형

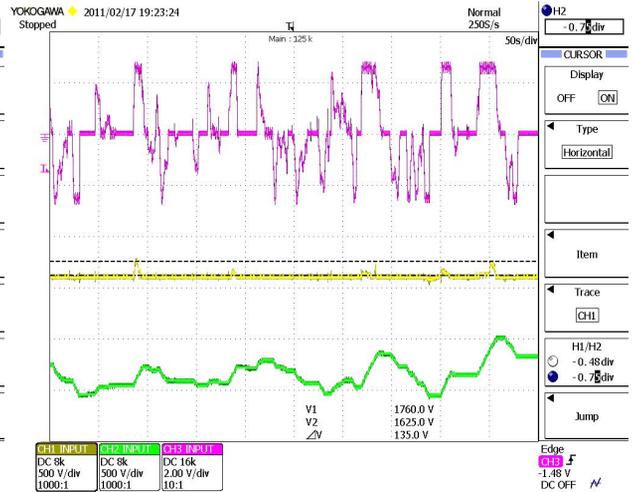


그림 8. 250A 전력모드 시험파형

그림 7.과 그림 8.은 에너지저장시스템 가동시 초기충전모드와 전력모드 동작 시 시험파형이다. 상단 파형은 슈퍼캐패시터에 흐르는 전류파형으로 가선전압의 변동에 따른 충,방전이 원활히 동작됨을 알 수 있었다.

중간파형은 가선전압의 파형으로 점선부분의 범위는 V1이 1760[V]를 나타내고 있으며, 이는 에너지저장시스템의 충전동작으로 인하여 가선전압의 안정화가 이루어지고 있음을 확인하였다. 파형에서 아래 부분은 슈퍼캐패시터에 충전, 방전되는 전압파형을 나타내고 있다.

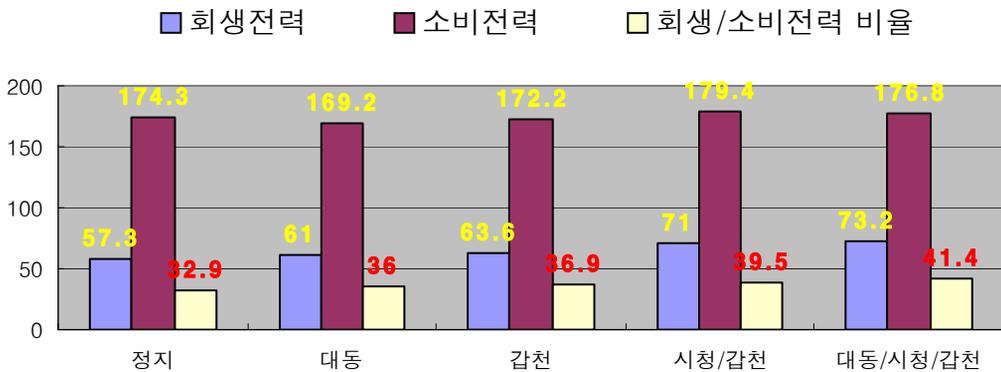


그림 9. 상선운행 시 소비전력대비 회생전력비율



그림 10. 하선운행 시 소비전력대비 회생전력비율

그림 9와 그림 10은 전동차가 본선 운행 시 상선과 하선에 대한 소비전력대비 회생전력비율을 나타내고 있으며, VVVF 인버터 입력단과 SIV 입력단에 PT와 CT를 설치하여 전력량 분석 장치에 연결하고 추출한 데이터를 분석하여 도표화 한 것이다.

그림의 좌측부분인 정지 그래프는 에너지저장시스템을 동작시키지 않고 차량을 상,하선 운행했을 때의 전력량비교이며, 우측으로 갈수록 에너지저장시스템을 추가로 가동시켜 추출한 시험데이터이다.

에너지저장시스템의 가동 유,무에 상관없이 차량 1개편성이 22.4[km]주행 시 소비되는 전력량은 약 175[kW]정도로 동일하게 측정되었으며, 본선변전소 5곳 중 3곳의 에너지저장시스템을 가동하였을 경우는 그림의 오른쪽 대동/시청/갑천 그래프를 보면 알 수 있듯이 에너지저장시스템을 모두 정지하였을 경우보다 회생전력은 상선이 57.3→73.2[kW]로, 하선은 57.1→71.3[kW]로 더 많이 발생되었다. 또한, 회생/소비전력 비율은 상선이 32.9→41.4[%]로, 하선은 33→40.3[%]로 향상되었음을 확인할 수 있었다.

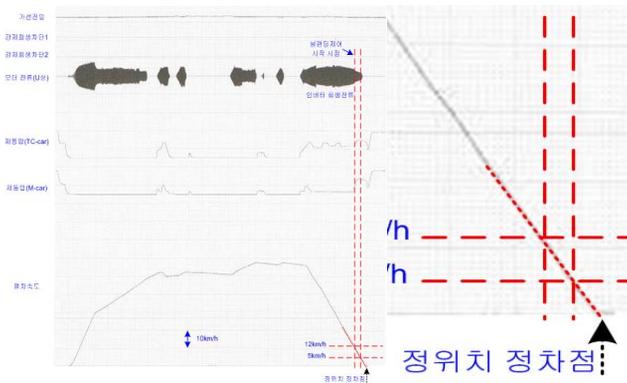


그림 11. 정위치 정차 파형

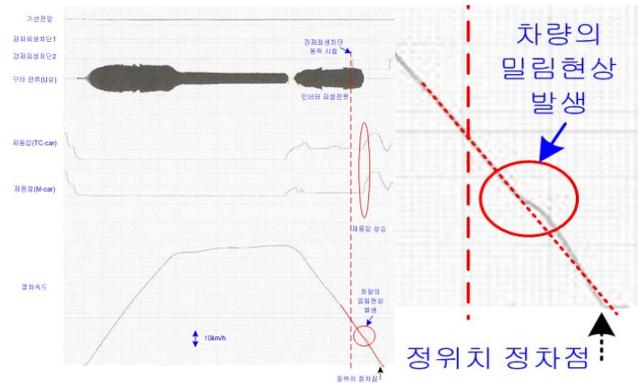


그림 12. 정위치 정차 실패파형(미주)

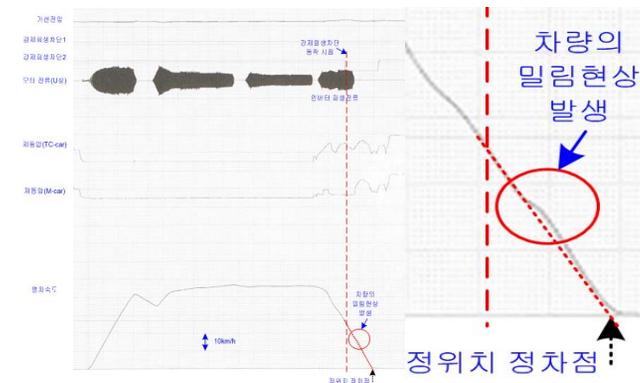


그림 13. 정위치 정차 실패파형(과주)

그림 11, 12, 13은 전동차 운행시 가선전압과 인버터 출력전류, TC-car와 M-car의 제동압, 열차속도를 레코더를 통하여 실시간 출력한 파형이다.

시험조건은 열차가 역진입하여 제동시 블랜딩 제어시점에서 가선전압의 상승에 의한 인버터 회생차단을 전제로 하여 강제로 회생차단을 시도하였다. 파형에서 알 수 있듯이 그림 11은 정위치 정차시 일정한 감속도를 가지고 정위치 정차하였음을 알 수 있으며, 그림 12는 회생차단이 약 17[km/h]에서 이루어져 블랜딩 제동없이 순수 공기제동으로 전환하여 요구 제동압이 커짐으로서 정위치 정차점(±35cm)을 벗어나 미주가 발생됨을 확인할 수 있다.

그림 13은 블랜딩제어 시작점에서 회생이 차단됨으로서 TCMS가 공기제동으로 전환하여 제동이 체결될 때까지의 지연시간에 의해 과주가 발생됨을 확인할 수 있다. 결과적으로 블랜딩 제동시 가선전압의 상승에 의한 회생차단이 발생될 경우 차량의 과주 또는 미주가 발생될 수 있음을 확인할 수 있었으며, 그 범위는 ±70~150[cm]범위였다.

5. 결론

본 논문에서는 도시철도 차량에서 제동시 발생하는 회생전력을 재활용하기 위한 에너지저장시스템을 시뮬레이션을 통하여 확인하고 대전도시철도 1호선 변전소에 에너지저장시스템을 설치 후 에너지저장시스템이 급전시스템에 미치는 영향과 차량의 회생에너지 증감량 및 가선수용성에 미치는 영향에 대하여 연구하였으며, 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

- [1] 회생에너지저장시스템의 모의 시뮬레이션을 통하여 DC1500[V] 시스템의 하드웨어구성 및 시스템의 시정수를 정하고 실제 시험을 통하여 시스템의 원활한 동작과 시스템의 안정화를 추구하였다.
- [2] 회생에너지저장시스템의 유,무에 따른 가선전원의 안정화 및 차량에서의 소비전력대비 회생전력량이 향상되었음을 시험을 통하여 확인하였다.
- [3] 전동차 블랜딩 제어시 회생에너지에 따른 가선전압의 상승으로 VVVF 인버터에 의한 회생차단이 발생하는 경우, 정위치 정차에 영향을 미치고 있음을 시험을 통하여 입증하였다.

참고문헌

1. 김길동, 김종대, 이한민 "전동차 회생 에너지 저장 시스템 개발에 관한 연구," 한국철도학회학술발표대회 논문집, pp. 24-28, 2005.
2. 김길동, 이한민 "전동차 회생에너지 활용을 위한 저장시스템 기술," 한국조명전기설비학회 논문집, 제 20권, 제2호, pp. 10-15, 2006.
3. 백승길, 임지영, 차준일, 김길동, 권경민 "에너지저장시스템의 충, 방전 Auto Level Tuning 알고리즘에 관한 연구", 한국철도학회 춘계학술대회 논문집 pp.126, 2010.
4. 김규중, 이근오, 김길동, 김주용, 백승길 "A Study on the Stabilization of Electro-Pneumatic Braking Blending for Using Regenerative Energy Storage System", 2010 International Conference on Accident Prevention pp.121.
5. B.J. Arnet and L.P. Haines, "High power DC-to-DC converter for supercapacitors," Electric Machines and Drives Conference, pp. 985-990, 2001.
6. Chan-Heung Park, "Design and Control Algorithm Research of Active Regenerative Bidirectional DC/DC Converter used in Electric Railway," The 7th International Conference on Power Electronics, October 22-26, 2007
7. J. Zhang, R. Y. Kim and J. S. Lai, "'High-Power Density Design of a Soft-Switching High-Power Bidirectional DC-DC Converter'", IEEE PESC Conf. Rec., pp. 1-7, 2006.
8. A. Adinolfi, R. Lamedica, C. Modesto, A. Prudenzi, and S. Vimercati, "Experimental assessment of energy saving due to trains regenerative braking in an electrified subway line," IEEE Trans. Power Delivery, vol. 13, no. 4 , pp .1536 - 1542, 1998.