

경량전철 시험선에서의 에너지저장시스템 연구

조홍식 류상환 황현철 이안호 김길동 이한민  
한국철도기술연구원

Study on Regenerative Energy Storage System in K-AGT Test Track

Hong-Shik Cho Sang-Hwan Ryu Hyeon-Chyeol Hwang An-Ho Lee Gil-Dong Kim Han-Min Lee  
Korea Railroad Research Institute

**Abstract** - LRT System Application Project is performed for the purpose of technical advancement and stabilization of K-AGT system from the viewpoint of practical use and commercialization. For those purpose, the performance test and evaluation procedure for K-AGT signaling system are developed, and the scheme of verifying the performance and function of signaling system under multi-train and driverless control environment is being conducted. For the multi-train operation in K-AGT test track, we applied the regenerative energy storage system in addition to the existing electric facilities. This paper present the design, manufacturing, and testing results of regenerative energy storage system.

1. 서 론

경량전철시스템실용화사업에서는 경량전철시스템기술 개발사업(1999년~2005년)을 통하여 개발된 한국형 표준 고무차륜경량전철시스템(Korean-Automated Guideway Transit, 이하 K-AGT)의 국내 보급 및 해외 수출기반을 마련하기 위한 실용화 및 상용화를 목적으로 한국철도기술연구원을 주관기관으로 하여 2007년부터 2009년까지 3개년간 추진되고 있다. 이 사업에서는 한국형 경량전철 신호시스템 기술을 고도화하고 안정화시키기 위하여 신호시스템에 대한 종합시험평가절차를 개발하고 국내에서 수행된 바 없는 다중편성 무인운전 환경에서 신호시스템의 성능 및 기능을 검증하기 위한 계획을 수립, 추진하고 있다.

경량전철 시험선에서 열차의 다중편성 운행이 가능할 수 있도록 안정적인 전력공급을 위해서는 기존의 변전설비의 보완이 요구되었으며 이에 대한 대책으로 차세대첨단도시철도시스템기술개발사업(2005년~2011년)을 통하여 개발된 에너지저장시스템을 시험선에 도입하여 경량전철 시험선용 회생에너지저장시스템을 제작, 구축하였다.

본 논문에서는 경량전철 시험선에 설치된 회생에너지저장시스템의 설계, 제작 및 에너지 활용성 측면에서의 시험 분석 및 결과 등을 제시한다.

2. 본 론

2.1 경량전철 시험선 회생에너지흡수장치 검토

경상북도 경산시 경량전철 시험선은 경량전철시스템기술개발사업을 통하여 개발된 한국형 경량전철(K-AGT) 시스템의 종합성능, 안전성 및 신뢰성을 검증하기 위하여 2004년 건설되어, 현재 K-AGT 2량 1편성에 대한 신뢰성시험이 수행되고 있다. 한국형 경량전철 신호시스템 기술의 성능 및 기능을 다중편성 무인운전 환경에서 검증하기 위하여 경량전철시스템실용화사업에서 차량 2량 1편성을 추가 제작하여 다중편성 운행 및 경량전철 상용

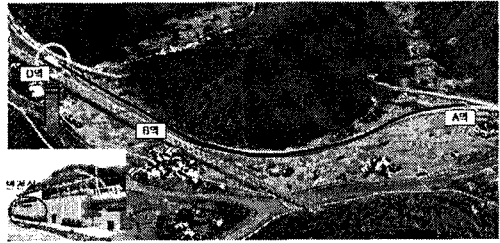


그림 1. 경량전철 시험선

화모델 6량 1편성에 대하여 시험선에서 성능시험을 수행할 계획이다.

K-AGT 시스템에서는 차량 제동에 있어서 기계적 제동과 함께 전기적 제동을 병용하여 사용하고 있다. 전기제동시에는 견인전동기를 발전기로 사용하기 때문에 제동 중 회생에너지가 생성된다. 통상 전철시스템에서 회생에너지량은 차량을 가속하기 위해 투입되는 에너지의 45~47% 정도로서 약 20% 정도는 타 전동차에서 소모되며, 에너지의 20~27% 정도는 잉여전력으로 남게 된다. 특히 직류철도에서는 변전소에서 수전받은 3상 교류를 직류로 변환하는데 있어 주로 정류기를 사용하고 있기 때문에, 잉여회생전력에 가선전압은 급작스럽게 상승 또는 하강을 반복한다. 이러한 가선전압의 불안정은 변전소의 정류기 및 차량에 탑재된 전력변환기의 장애를 일으킬 수 있기 때문에 잉여회생전력을 강제로 소모시켜 안정된 가선전압을 만드는 장치가 반드시 필요하다.

현재 경량전철 시험선에서는 회생에너지를 흡수하는 장치로 회생용저항기(750V, 300kW)로 다중편성시험 및 6량 1편성 차량 운행에서 발생하는 회생에너지를 흡수하기 위해서는 1200W급 이상의 저항기 용량 증대가 필요하다. 또한, 시험선에서는 최대 2편성 운행이기 때문에 발생하는 잉여회생전력이 타 차량에서 활용하는 것은 거의 기대할 수 없으므로 회생용 저항기는 잉여회생전력을 활용 못하고 소모시키기만 하게 되어 에너지 활용성 측면에서 효율성이 떨어진다. 근래 관련 기술의 발달로 선진국에서는 회생에너지를 소모시키지 않고 저장시켜서 필요시 다시 활용할 수 있는 회생에너지저장장치가 개발 도입되고 있으며 국내에서도 차세대첨단도시철도시스템기술개발사업을 통하여 750V급(경전철용) 에너지저장시스템에 대해서 제작 및 종합시험이 완료되었다. 이에 경량전철 시험선에서는 에너지 활용성 측면에서 이점을 갖고 있는 회생에너지저장시스템을 도입하였다.

2.2 에너지저장시스템

회생에너지저장시스템은 전동차 제동시 발생한 회생에너지를 저장하고, 전동차 역행시 가선 전력이 부족한 경

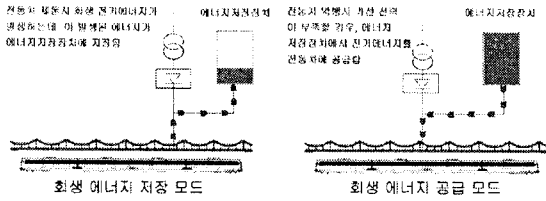


그림2. 회생에너지저장시스템 개념도

우, 전기에너지를 전동차에 공급하여 전력비용을 절감할 수 있는 기술이다.

회생에너지저장시스템은 그림3에서 보는 바와 같이 3개의 박스로 구성되어 있다. 전력변환장치 BOX ASS'y 1은 가선입력단에 대한 필터와 보호동작을 위한 컨택터와 퓨즈로 구성된 입력 접촉부 unit과 슈퍼캐패시터에 이상 발생시 슈퍼캐패시터의 전압을 방출하기 위한 방전저항 unit 그리고 쇼퍼 unit 1으로 구성된다. 전력변환장치 BOX ASS'y 2는 쇼퍼 unit2, 쇼퍼 unit3로 구성되어 슈퍼캐패시터 뱅크의 BOX에 결선된다. 시스템은 이와 같이 각각의 쇼퍼 unit이 각각의 슈퍼캐패시터 ASS'y를 충방전 하도록 설계되었고, 각각의 변환장치들은 입력단 unit에 의해 병렬 결선되어진 형태로 구성된다.

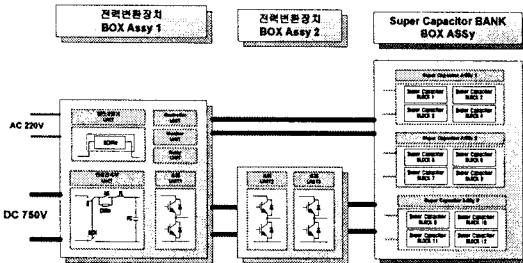


그림3. 회생에너지저장시스템 구성도

경량전철 시험선에 구축된 회생에너지저장장치의 기본 사양은 다음 표와 같으며 제작된 에너지저장시스템의 사진은 그림4와 같다.

표1 경량전철 시험선 회생에너지저장장치 사양

구분	세부항목	규격	
슈퍼캐패시터	구조	중량	2,100[kg]
		크기	2.37(H)X1.64(W)X1.75(D)[m]
	전기적 특성	최대전압	583.6[V]
		최대전류	1,500[A]
		캐패시터	82.5[F]
총 용량	14[MJ]		
쇼퍼부	구조	크기	1.69(H)X1.2(W)X1.54(D)[m]
		가선측 전압	충전전압
	방전전압		730[V]
	최대전류		750[A]
	슈퍼캐패시터	전압	280~560[V]
최대전류		1,500[A]	
고속차단기	크기	정격전압	500X170X540[mm]
		정격전류	1,500[A]
	차단전류	정격전류	1,000[A]
		차단전류	1,000~1,800[A]
방전저항	저항	10[Ω]	
	최대전류	56[A]	

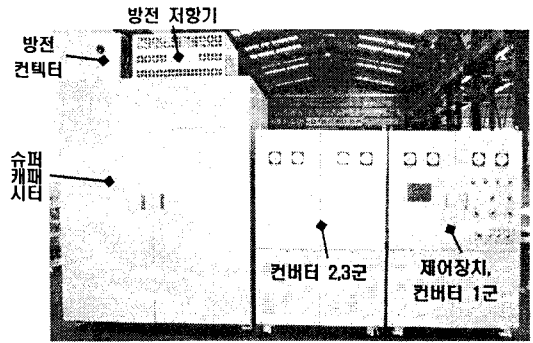


그림4. 회생에너지저장시스템 사진

### 2.3 에너지저장시스템의 에너지절감률 측정 및 분석 2.3.1 에너지절감률 측정 절차

경량전철 시험선의 급전시스템은 AC22.9kV의 한전 전력을 입력으로 변압기를 통하여 강압한 후 12-펄스 정류기를 통해 DC 전력을 공급하는 직류 시스템으로 그림5와 같다. DC 전력을 공급하는 Feeder는 Feeder1과 Feeder2가 병렬 접속된 구조로 전동차에 DC 전력을 공급한다. 에너지저장장치의 설치로 인한 에너지 절감효과를 측정하기 위하여 변전소의 DC 전차선측에 전압 및 전류 센서를 설치하여 에너지 저장장치의 기동/정지시의 소비전력을 측정한다. 측정개소는 그림 5와 같이 Feeder1, Feeder2의 전류(CT1, CT2), DCPT 전압의 3개소로 한다.

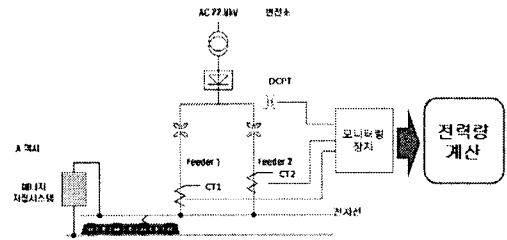


그림5. 시험선 급전시스템 및 측정

시험에 사용된 차량은 K-AGT 상용화 차량으로 그 제원은 다음과 같다.

표2 전동차 사양

항목	사양	
차량편성	6량1편성	고정편성
	편성구성	MC1-M1-M2-M3-M4-MC2
차량중량	공차	11.5 ton/량
	만차	18.0 ton/량
공급전원	가선전압	DC 750V(변동범위: 500~900V)
	급전방식	제3레조 방식
차량성능	운행최고속도	60km/h
	가속도	3.5km/h/s
	감속도	3.5km/h/s(상용) 4.5km/h/s(비상)
	저크한계	0.8m/s <sup>3</sup> 이하
정격출력(연속)	660kW(110kW 모터 6개)	

시험은 시험선 전체 노선 중 경사가 적고 역간 거리가 큰 A역과 B역 사이의 왕복 운행으로 규정하였다. 전동차가 운행될 A-B 역사의 선로 조건은 그림6과 같으며 전체 길이 1,230m에 최대 구배 9 [%]로 정의된다.

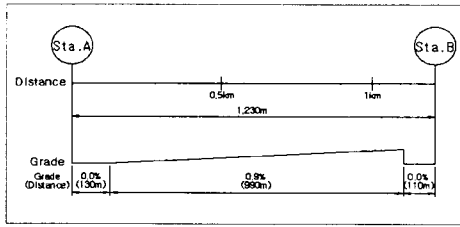
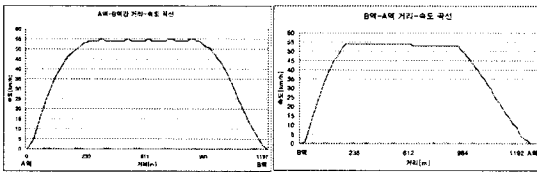


그림6. A-B 역사간 선로조건

A역에서 B역은 상구배 9[‰]로 최대속도 53km/h로 자동 운행되고 B역에서 A역으로 운행시는 최대속도 55km/h로 수동 운행되었다. 그림7은 A역에서 B역까지 그리고 B역에서 A역까지 운행하였을 때 거리-속도 곡선을 보여준다.



(a) A → B (b) B → A  
그림7. A-B 역간 운행패턴

에너지저장장치의 효율성을 검증하기 위하여 차량 만차시 및 공차시 그리고 에너지저장장치의 가동시 및 정지시 각각의 사례에 대하여 5회 이상 동일 조건에 대하여 차량을 운행하면서 측정하였다

### 2.3.2 측정 결과

그림8은 A-B 역간 6량 1편성 경량전철의 공차조건에서의 운행시, 에너지 저장장치로부터 가선으로 유입되는 가선전류, 가선전압 및 슈퍼캐패시터의 전압 및 전류를 나타낸다. 열차가 각 역에서 출발하여 역행하여 가속시 전력을 소모하여 가선전압이 떨어지고 이를 보상하기 위하여 에너지저장장치의 슈퍼캐패시터에 저장된 전력이 가선에 공급되어 차량에 전력을 공급하게 된다. 또한 제동시 발생하는 회생에너지에 의해 가선전압이 올라가게 되면 에너지저장장치에서 이를 흡수하여 슈퍼캐패시터에 저장하면서 가선전압이 상승하는 것을 막는다. 이 그림으로 에너지저장시스템이 회생에너지를 저장 활용하면서 가선전압의 안정화에 기여하는 두가지 장점을 확인할 수 있다.

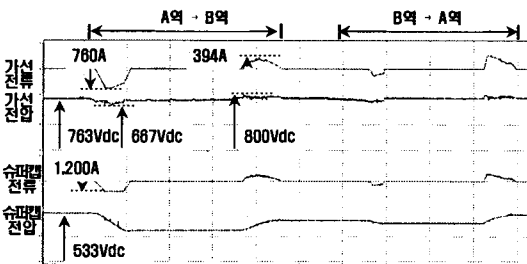
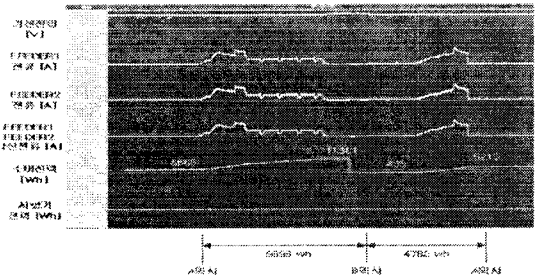
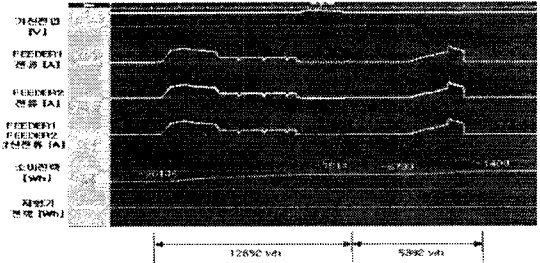


그림8. 에너지저장장치 측정 파형

그림9는 만차상태로 운행시 에너지저장장치가 가동될 때와 가동하지 않았을 때 변전실에서 측정된 가선전압 및 Feeder 전류, 그리고 소비전력을 보여준다. 표3은 각각의 사례에 대하여 5회 이상 반복하여 A-B역간을 왕복 운행하였을 때, 측정한 결과의 평균값 및 에너지절감률을 보여준다.



(a) 에너지저장장치 가동시



(b) 에너지저장장치 정지시

그림9. 변전소 측정 소비전력 측정 파형

표3. 측정 결과 및 에너지절감률

차량	에너지저장장치	소비전력 [Wh]	에너지절감률 [%]
만차	가동	13,957	20.64
	정지	17,588	
공차	가동	10,711	13.66
	정지	12,404	

에너지절감률은 에너지저장장치를 가동하지 않았을 때 열차 운행에 소비되는 전력량에 대한 가동하였을 때의 전력량 차의 비로 계산하였다. 만차시 약 20% 이상의 에너지 절감 효과를 보여줌으로써 에너지저장시스템의 효율성을 입증하였다. 시험선 에너지저장시스템의 설정이 만차운행에 적합하게 설정하였기 때문에 공차 상태에서는 절감률이 더 적게 나온 것으로 추정된다.

### 3. 결 론

본 논문에서는 에너지 절감이라는 측면에서 회생에너지저장시스템의 유용성을 확인하였다. 경량전철시험선에서의 운영환경에 맞도록 에너지저장시스템을 설계하여 구축하였으며 잉여회생에너지의 흡수에 나아가서 저장하여 차량 전력 요구시 저장된 에너지를 공급함으로써 에너지를 재활용할 수 있을뿐더러, 가선전압을 안정시켜 차량에 안정적인 전력공급을 가능케 할 수 있었다. 향후 시험선에서의 신뢰성시험을 통하여 최적의 운영방식을 도출할 계획이다.

#### [참 고 문 헌]

- [1] 한국철도기술연구원, "신호시스템 종합시험평가 1차년도 연구보고서", 2007.12
- [2] 한국철도기술연구원, "무인경량전철시스템 RAMS 향상연구 2차년도 연구보고서", 2007.12
- [3] 한국철도기술연구원, "차세대 전철시스템 에너지회생장치 개발 4차년도 연구보고서", 2007.5
- [4] 한국철도기술연구원, "차세대첨단도시철도시스템기술개발사업 2차년도 연구보고서", 2007.10