

전기철도 차량 탑재용 회생 에너지저장시스템에 관한 연구

이한민, 이장무, 오세찬, 김길동, 박현준

한국철도기술연구원, 한국철도기술연구원, 한국철도기술연구원, 한국철도기술연구원, 한국철도기술연구원

A Study on On-Board Energy Storage System for Urban Transit System

Hanmin Lee, Changmu Lee, Sehchan Oh, Gildong Kim, Hyunjune Park  
KARI, KARI, KARI, KARI, KARI

**Abstract** - The energy storage system is considered to be one of the useful devices for energy storing and recycling. Also the energy storage system can stabilize the system voltage. This paper proposes the type of on-board energy storage system .

1. 서론

본 연구는 전기철도 차량의 회생 에너지 저장 시스템에 관한 것으로서, 전기철도 차량에 필요한 공급하는 판토티그래프, 전기철도 차량에 동력을 공급하는 전동기, 판토티그래프를 통해 전원이 공급되고, 전동기에 공급되는 전압과 주파수를 제어하여 열차의 속도를 제어하도록 하는 전력 변환장치, 전기철도 차량에 탑재되어 회생 제동에 의해 발생한 회생 전기에너지를 충전 또는 방전하는 에너지 저장장치, 에너지 저장장치의 작동을 제어하여 전기에너지와 운동에너지간의 변환 및 상기 회생 전기에너지의 총방전을 제어하는 제어장치를 포함한다. 전기철도 차량의 회생 제동시에 발생하는 회생 에너지가 차량에 탑재되어 있는 에너지 저장장치에 공급되어 저장됨으로써 가선 전압의 변동 요인이 저감되는 것을 방지하면서 회생 실효도 감소시킬 수 있고, 전기철도 차량의 안정적인 회생 제동이 가능할 뿐만 아니라, 차량 역행시 저장된 회생 에너지를 차량 내 전동기에 공급하여 에너지를 절감할 수 있다. 또한, 직류-교류의 전원 방식에 관계없이 회생 제동에 의한 에너지의 활용이 가능할 뿐만 아니라 가선 정전시 자력 주행이나 비전철화 구간과 전철화 구간의 상호 주행도 가능해진다.

2. 차량 탑재용 에너지저장장치 필요성

전기철도 차량의 회생 제동은 전동기를 발전기로 작동시켜 전기철도 차량의 주행중 운동 에너지를 전기 에너지로 변환해 회수하여 제동력을 발휘하는 전기 제동 방법이다. 철도에서는 전기철도 차량나 전기 기관차의 주전동기로 발전해 발생한 전기 에너지는 가선을 통해 송전한다. 이를 통해 열차의 소비전력을 감소(역행 시간과 제동 시간으로 상세)시킬 수 있으며, 터널 내 온도 상승 문제도 줄일 수 있다. 최근, 전기철도 차량 대부분이 에너지 절약을 위해 회생 제동 방식을 채용하고 있다.

가속된 전기철도 차량이 관성으로 주행 중 정차를 위해 감속을 할 때, 전기철도 차량의 운동에너지를 이용하여 전동기를 제어함으로써 발전을 하고, 이를 가선으로 되돌리는 방식으로 회생제동 방식을 이용한다. 따라서, 회생 제동 방식을 채용한 전기철도 차량을 전체 시스템의 전력 소모량을 감소시킬 수 있을 뿐만 아니라, 기계적 제동에 의한 소음 문제 및 브레이크의 마모를 방지할 수 있는 등의 장점을 가지고 있다. 그러나, 전기철도 차량의 발전 전기를 가선에 그대로 되돌리는 경우에, 회생시 순간적으로 발생한 에너지가 가선 전압을 변동시켜 시스템을 불안정하게 할 뿐만 아니라, 후행 전기철도 차량이 그 전압을 수용하지 못할 경우에 가선 전압의 변동 요인으로만 작용하고 후행 차량의 고장 원인이 되고 있다. 이러한 문제점

을 해결하기 위해, 교류 급전 시스템에서는 회생전력을 전원측으로 반환하고 있고, 직류 급전 시스템에서는 회생용 인버터를 설치하여 가선의 전압을 교류로 전환하여 전원측으로 반환하는 방식이 도입되고 있다. 그러나, 여러 대의 전기철도 차량에 의해 발생하는 회생전력이 인버터를 통해 그대로 여과없이 전원측으로 반환되는 경우에, 고조파를 함유하고 있어 수용가에 예기치 못한 피해가 발생하고, 신호설비의 주파수 간섭 등에 영향을 줄 우려가 있다. 또한, 전기철도 차량에서 가선과 판토티그래프는 매우 효율적인 급전 방식이지만 가선 부설을 위한 초기 비용 및 보수 비용이 소요되고, 도시 경관을 해칠 우려가 있는 문제점이 있다. 과거의 시스템 중, 교류 급전 시스템에서는 회생전력을 전원측으로 반환하고 있고, 직류 급전 시스템에서는 회생용 인버터를 설치하여 가선의 전압을 교류로 전환하여 전원측으로 반환하고, 도시철도 회생전력 저장시스템은 변전소나 역사내에 에너지저장시스템 설비를 설치하여 회생 에너지를 이용한다. 근본적으로 회생 제동을 더욱 효율적으로 이용하기 위해서 차량에서 발생한 회생 에너지를 차량 내에 탑재된 에너지저장장치에 저장시킨 후 전기철도 차량의 역행시 차량 내 전동기에 직접 공급하도록 하는 구조에 대한 연구 개발이 필요한 실정이다. 따라서 차량 탑재용 회생 에너지저장시스템은 직류, 교류의 전원 방식에 관계없이 회생 제동에 의한 에너지의 활용이 가능할 뿐만 아니라 가선 정전시의 자력 주행이나 비전철화 구간과 전철화 구간의 상호 주행도 가능해질 수 있다.

3. 차량 탑재용 에너지저장장치

차상에 에너지저장장치를 탑재하는 형태로 4가지 분류가 가능하다. 시스템 구성에 따라 가선이 전혀 필요 없고 전원이 에너지저장장치만으로 구성된 무가선 에너지저장시스템이다. 무가선에 두개의 전원인 에너지저장장치와 엔진으로 구성된 무가선 엔진조합 에너지저장시스템, 현재 가선이 있는 상태에서 전원이 에너지저장장치와 변전소로 구성되며 전원 조건에 따라 직류 가선조합 에너지저장시스템과 교류 가선조합 에너지저장시스템으로 구성된다. 그림 1은 전기철도차량 탑재용 에너지저장시스템 전체 구성을 나타낸다.

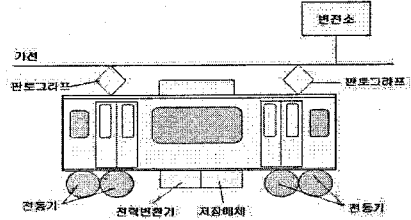


그림 1. 차량 탑재용 에너지저장시스템 구성도

그림 2는 무가선 에너지저장시스템 블록도, 그림 3은

무가선 엔진조합 에너지저장시스템 블록도, 그림 4는 직류 전압공급의 직류 가선조합 에너지저장시스템 블록도, 그림 5는 교류 전압공급의 직류 가선조합 에너지저장시스템 블록도이다. 주행 및 정차를 반복하면서 정차역 사이를 운행하는 전동차는 가선을 통해 전기 에너지를 공급받아 전동기를 구동함으로써 가속을 하게 되고, 일정한 속도로 가속된 후에는 관성을 이용하여 관성운행을 하게 되며, 감속시에는 전동기가 발전기 기능을 하면서 전동차의 관성 운동에너지를 이용하여 회생 에너지가 발생하게 된다. 이와 같이 발생된 회생 에너지를 차량에 탑재된 에너지 저장장치로 공급하여 에너지 저장매체(슈퍼커패시터, 플라이휠, 배터리 등)에 저장할 수 있도록 구성한다. 따라서 시스템 구성에 따라 회생에너지를 에너지저장장치로 공급되어 저장되게 함으로써, 회생에너지에 의해 가선 전압이 변동하는 것을 방지하면서도 회생효율을 감소시키는 것이 가능하게 된다. 또한 직류-교류의 전원 방식에 관계없이 회생제동에 의한 에너지의 활용이 가능하다. 뿐만 아니라 가선 정전 시의 자력 주행이나 비전철화 구간과 전철화 구간의 상호 주행 등도 가능하게 된다.

차장에 에너지저장장치를 탑재하는 형태로 시스템 구성에 따라 4가지 분류가 가능하다.

○무가선 에너지저장시스템 - 구동전원 : 에너지저장매체  
 그림 2는 가선이 전혀 필요 없고 전원이 에너지저장매체만으로 구성된 무가선 에너지저장시스템이다.

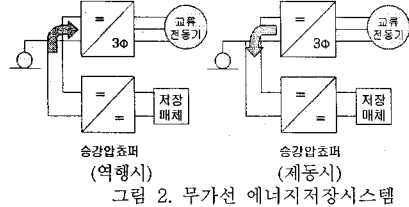


그림 2. 무가선 에너지저장시스템

가선과 판토틀라프는 매우 효율적인 급전 방식이지만, 가선부설을 위한 초기 비용, 보수 비용이 든다는 점, 도시 결관을 해친다는 것이 문제점이다. 가선이 없는 경우 그림 2와 같이 철도 차량에 탑재하여 역행 시는 에너지를 방전하여 전동기를 구동하고 제동 시에는 회생에너지를 모두 에너지저장장치에 충전한다.

○무가선 엔진조합 에너지저장시스템 - 구동전원 : 에너지저장매체 및 엔진

그림 3은 무가선에 두개의 전원인 에너지저장매체와 엔진으로 구성된 무가선 엔진조합 에너지저장시스템이다.

그림 3과 같이 철도 차량이 디젤엔진으로 구동하는 경우, 에너지저장장치를 철도 차량에 부착하여 역행 시 엔진과 에너지저장장치로부터 에너지를 공급하여 전동기를 구동하고 제동 시에는 회생에너지를 모두 에너지저장장치에 충전한다.

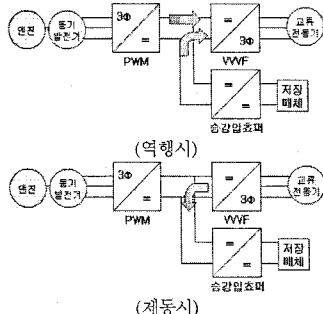


그림 3. 무가선 엔진조합 에너지저장시스템

○가선조합 에너지저장시스템 - 구동전원 : 에너지저장매체 및 변전소

그림 4와 5는 현재 가선이 있는 상태에서 전원이 에너지저장매체와 변전소로 구성되며 전원 조건에 따라 직류 가선조합 에너지저장시스템과 교류 가선조합 에너지저장시스템이다. 변전소와 에너지저장장치를 병렬로 접속하여 전력을 분배하는 방식이다. 위에서 설명한 무가선 엔진조합시스템은 회생 제동시 회생 에너지가 에너지저장매체로만 에너지가 이동한다. 하지만 가선조합 에너지저장시스템은 회생 제동시 회생 에너지가 에너지저장매체와 변전소로 이동한다. 따라서 가선조합 에너지저장시스템은 전원이 변전소와 에너지저장매체 2개가 된다.

·직류 가선조합 에너지저장시스템 - 구동전원 : 에너지저장매체 및 직류변전소

그림 4와 같이 역행 시는 변전소와 에너지저장장치로부터 전력을 공급받아 교류전동기를 구동하고 제동 시에는 회생 전력을 에너지저장장치에 충전하고 나머지를 가선으로 되돌린다.

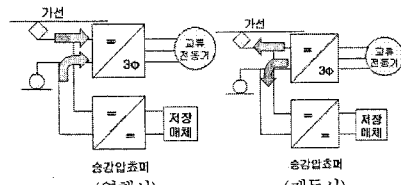


그림 4. 직류 가선조합 에너지저장시스템

·교류 가선조합 에너지저장시스템- 구동전원 : 에너지저장매체 및 교류변전소

그림 5와 같이 교류 전동차는 무가선 엔진조합 에너지저장시스템에서 엔진과 동기발전기를 가선과 병합기로 대체하면 된다.

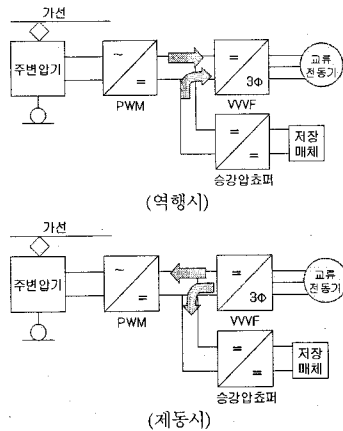


그림 5. 교류 가선조합 에너지저장시스템

본 연구는 발생된 회생 에너지를 차량에 탑재된 에너지저장장치로 공급하여 에너지 저장매체에 저장할 수 있도록 구성한다. 이때 에너지 저장매체는 슈퍼커패시터, 플라이휠, 배터리 중 하나 또는 두가지 이상을 조합한 형태로 구성한다.

그림 6 및 7과 같이, 차상 탑재용 에너지저장 매체로서 슈퍼커패시터, 플라이휠, 배터리 등이다.

슈퍼커패시터는 급속 충방전에 적합한 것, 충방전의 반복에 의한 수명의 열화가 없는 것 등 차량 탑재 에너지 저장 매체로서 바람직한 특성을 갖고 있다. 플라이휠은 전기 에너지를 끌

라이필의 회전에 의해 운동 에너지로 변환하여 비축하는 것으로 동일 질량으로 비축하는 에너지량을 늘리기 위해 고속 회전하여 사용한다. 급속 충방전에 적합하고, 충전된 에너지는 회전수로 판단되기 때문에 차량 탑재용으로 사용 가능하다. 배터리는 산화제와 환원제를 전자와 이온을 증대로서 반응시켜, 그 때 방출 되는 에너지를 직접 전기 에너지로 변환하는 것이다. 니켈 수소 전지는 자동차용으로 사용되고 있고, 리튬 이온 전지는 니켈 수소전지보다 고효율력에 적합하므로, 향후 폭 넓게 사용가능하다.

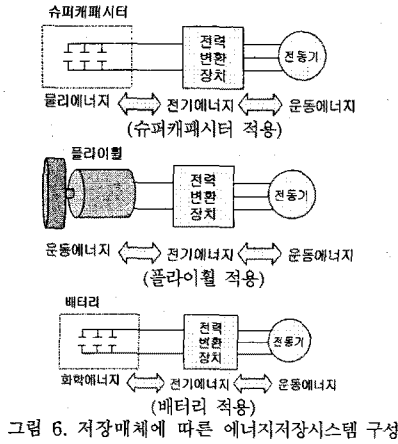


그림 6. 저장매체에 따른 에너지저장시스템 구성

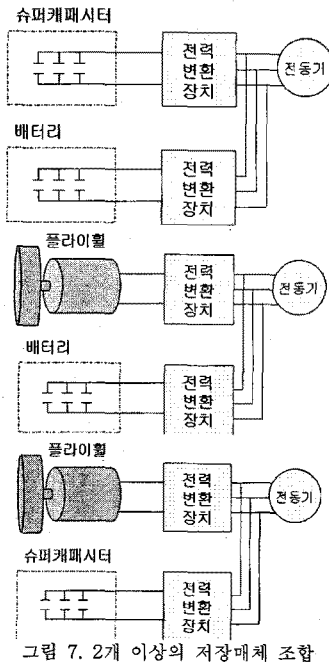


그림 7. 2개 이상의 저장매체 조합

본 연구는 이와 같은 구성으로 인해 전기철도차량으로부터 발생된 회생에너지를 차량에 탑재된 에너지저장장치로 저장하고, 전동차 역행시 에너지저장장치에서 저장된 전기에너지를 차량내 전동기에 공급할 수 있도록 한다. 따라서 전기철도시스템에서 전기철도차량의 회생제동에 의한 시스템의 고장 및 불량 요인을 제거하면서도 회생제동을 효율적으로 이용할 수 있게 된다.

#### 4. 결론

본 연구에서 제안한 전기철도 차량 탑재용 회생 에너지 저장시스템의해, 전기철도 차량의 회생 제동에 의한 시스템의 고장 및 불량 요인을 제거할 수 있고, 회생 제동을 효율적으로 이용할 수 있는 효과가 있다.

즉, 전기철도 차량의 회생 제동시에 발생하는 회생 에너지가 차량에 탑재되어 있는 에너지 저장장치에 공급되어 저장됨으로써 가선 전압의 변동 요인이 저감되는 것을 방지하면서 회생 실효도 감소시킬 수 있고, 전기철도 차량의 안정적인 회생 제동이 가능할 뿐만 아니라, 차량 역행시 저장된 회생 에너지를 차량 내 전동기에 공급하여 에너지를 절감할 수 있다.

또한, 전기철도 차량 탑재용 회생 에너지저장시스템은 직류, 교류의 전원 방식에 관계없이 회생 제동에 의한 에너지의 활용이 가능할 뿐만 아니라 가선 정전시의 자력주행이나 비전철화 구간과 전철화 구간의 상호 주행도 가능해질 수 있는 효과도 있다. 또한, 무가선 상태에서 회생 에너지 저장에 가능해지므로 도시 경관에도 큰 영향을 미치지 않으면서 가선 부설을 위한 초기 비용 및 보수 비용이 소모되지 않아 비용을 절감할 수 있는 효과도 있다.

#### References

- [1] AG, "SITRAS SES, Energy storage system for mass transit systems", 2005.
- [2] brochure, "CAPAPOST Regenerative Power Storage System", 2006.
- [3] KONISHI, Shin-ichi HASE, "Energy Storage System for DC Electrified Railway Using EDLC", QR of RTRI, Vol. 45, No. 2, May. 2004.
- [4] "Power recycle vehicle", 2005.
- [5] S., Konishi, T., Okui, A., Nakamichi, Y., Nara, H., and Uemura, T. : PCC-Osaka 2002, Proc. Fundamental Study on Energy Storage System for DC Electric Railway System., 1456-1459, 2002.
- [6] Harris Jones, "Global Markets for Capacitors, Flywheels and SMES Systems : Emerging and Mature Technologies", Business Communications Company, Inc., 2006.
- [7] A. Schneuwly, M. Bartschi, V. Hermann, G. Sartorelli, R. Gallay, R. Koetz, "Boostcap Double-layer capacitors for peak power automotive applications", Proceedings of the Second International ADVANCED AUTOMOTIVE BATTERY Conference(AABC), Feb. 2002, Las Vegas, Nevada.
- [8] 2002. 11. 초전도를 이용한 중소형 전력저장 장치에 관한 보고서, 한국전기연구원.
- [9] Supercapacitor의 특성 및 응용, 한국전기연구소 전지연구그룹 보고
- [10] 2004.6 에너지 절약 기술동향, 제 31호
- [11] 2005.2 전력저장기술의 최근의 동향, 철도와 전기기술 VOL.16 No.2
- [12] 2002.4 초전도 에너지저장 시스템 기술개발 동향, 전력전자학회지 제7권 제2호,
- [13] 2004 Contact-wire-less Tramcar using Rechargeable Lithium Ion Battery, Japanese Railway Engineering no.152
- [14] 전력리사이클차량 - 가선과 충전지의 하이브리드형 전차, 철도의 미래를 향한 연구개발, RRR 2005.7
- [15] 전전기브레이크의 기술동향, 철도차량과 기술 No.74
- [16] 회생 브레이크와 에너지, 철도차량과 기술 No.78