

전동차 회생에너지 활용을 위한 저장시스템 적용기술 연구

김길동, 이한민, 오세찬, 이장무
 한국철도기술연구원, 한국철도기술연구원, 한국철도기술연구원, 한국철도기술연구원

A study on technical application of recycle energy storage system for electric rail car

Gildong Kim, Hanmin Lee, Sechan Oh, Changmu Lee
 KRRI, KRRI, KRRI, KRRI

Abstract - There are operated the six thousand train in the interior of a country. 95% of them are possible usage of resuscitation. Especially, Among them VVVF-Inverter vehicle has a merit of the highest recycle rate. but we don't use a apt recycled energy. Although the existing recycle energy used inverter method supply with electric power, it is decided in accordance with the state of sources. So efficiency of recycled electric power is of poor quality and catenary-voltage-fluctuation be generate because of recycled electric power. and it is able to affect system of safety train service. We'll research the method of supply according to wire condition after storing recycle energy made during train's stopping relation to Advanced EMU Research. Those methods are divided SMES, Fly-Wheel and Supercapacitor. and Considering the both economical efficiency and system application, we'll develop recycle energy storage system suitable our country condition.

즉, 감속하는 차량에서 회생되는 잉여 회생에너지(직류전력)를 교류전력으로 변환하여, 그 에너지를 활용하는 것을 목적으로 한 시스템이다.

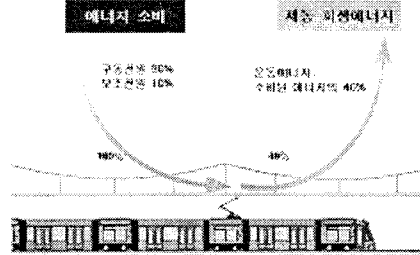


그림 1. 회생 에너지 저장시스템의 개념도

일반적으로 두 차량의 감속과 운행이 동시에 발생하는 경우에는 별도의 에너지 저장과정을 거치지 않고, 감속하는 전동차에서 회생된 에너지는 운행을 시작하는 전동차에 전달하는 방식으로 전력이 소모될 수 있지만, 전동차 운전 시격이 맞지 않는 경우에는 전력 소비가 심화된다. 이러한 문제점을 해결할 에너지 저장시스템은 변전소의 모선과 연결되어 차량이 회생할 때 차량에서 발생된 전력에 의해 전차선의 전압이 올라가면 이 에너지가 에너지 저장장치에 저장되고, 차량이 역행을 하면 전차선 전압이 내려가므로 에너지 저장장치는 이 에너지를 전차선을 통해 차량에 공급하게 되는 방식이다.

그림 2(a,b)에서는 이러한 원리들을 개념적으로 설명하였다.

그림 2(a)는 전동차가 감속시 추진인버터시스템이 발전기로 동작하여 에너지를 발생하며 가선전압보다 상승하게 됨으로써 에너지 저장장치에 전력을 공급하는 방식을 나타내고 있다. 또한, 그림2(b)는 전동차가 운행시 가선전압이 정격전압보다 0.5% 변동시, 기존전압보다 낮을 경우 저장되었던 회생에너지를 전력변환하여 DC로 공급하는 방식을 나타내고 있다.

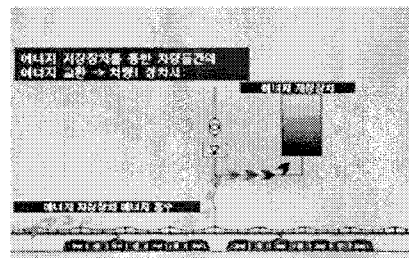


그림 2(a). 전동차 감속시 에너지 저장

1. 서 론

우리나라는 6000량 이상의 전동차량이 운행되고 있다. 이 중 95% 이상의 차량은 회생이 가능한 시스템 구조로 되어 운행되고 있다. 그중에서도 특히 VVVF 인버터 차량은 회생율이 높은 시스템이나 회생된 에너지 활용이 떨어지고 있는 상황이며, 대내적으로는 유가 상승으로 인하여 에너지 활용이 절실히 요구되는 시점이다. 기존의 인버터 방식을 활용한 전력 회생은, 전원에 전력을 회생하였으나, 전원의 상태에 따라 정해지기 때문에 회생전력사용이 효율적이지 못했고, 또한 회생전력으로 인한 가선 전압 변동 요인도 발생하고 있어, 시스템 안전 운행에 영향을 미칠 수도 있다.

이러한 요인들을 해결하고 효율적인 전동차 회생에너지를 활용하기 위한 방법으로 '플라이휠' 과 'Supercapacitor' 및 'SMES'와 같은 방식이 있으며 이러한 방법들은 전동차 정차 시 발생하는 에너지를 저장장치에 저장하여 가선의 조건에 따라 공급하여 주는 방식이다. 본고에서는 차세대 핵심 기술 개발과 관련하여 전동차 회생에너지를 활용하기위한 방식들을 제시하고, 회생에너지를 사용함으로써 생기는 경제적 이익 및 시스템 적용성을 고려하여 국내 전동차량에 적합한 회생 에너지 저장 시스템을 개발하기위한 방향을 소개하고자 한다.

2. 전동차 회생에너지 저장시스템 개요

그림 1에서와 같이 감속하는 전동차(회생차량)은 감속시 순간적으로 회생에너지를 발생시키며, 이때 생성된 에너지를 효율적으로 에너지 저장시스템에 저장하였다가 역행차량에 필요한 에너지를 공급해주는 방식이다.

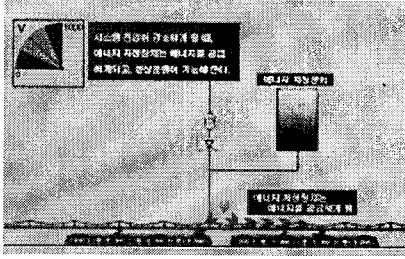


그림 2(b). 가선전압 부족시 차량공급
그림 2. 에너지 저장 및 방전 다이어그램

이러한 에너지 저장 시스템에는 크게 플라이휠과 Supercapacitor 그리고 SMES방식이 있다. 하지만 이중에서 SMES방식은 다른 에너지 저장 시스템방식과 비교하였을 때, 에너지 용량도 적은 반면, 가격은 상대적으로 고가이기 때문에 우리의 경제성과 시스템 적용성을 고려하여 연구하는 전동차 에너지 저장장치로써 활용하는데 적합하지 않다.

그래서 본고에서는 활용가능성이 높고, 연구의 핵심인 경제적 이익과 시스템 적용성을 만족시킬 수 있는 에너지 저장방식으로 플라이휠과 Supercapacitor방식을 중점적으로하여 전동차 에너지 저장시스템개발을 위한 연구를 진행 할 예정이다..

3. 플라이휠 에너지 저장시스템

플라이휠 에너지 저장시스템은 입력되는 잉여 전기에너지를 플라이휠의 관성을 이용, 회전 운동에너지로 변환하여 저장하고 필요시 전기에너지로 순시에 출력하는 장치로 배터리와 같은 화학적 에너지 저장장치에 대비되는 기계적 에너지 저장방식이다. 즉, 발전소의 모선에 연결되어 차량이 회생할 때 차량에서 발생된 전력에 의해 전차선의 전압이 올라가게 되면 이 에너지가 플라이휠 에너지 저장장치에 저장되고, 차량 역행시 전차선 전압이 내려가게 되면 플라이휠 에너지 저장장치는 이 에너지를 전차선을 통해 차량에 공급하게 되는 저장 방식이다.

이를 통하여 차량의 역행시는 가선전원의 부족분을 보충하는 보조전원으로의 역할을 수행하고, 차량의 회생시는 회생 전력을 저장하는 역할을 동시에 수행하게 된다.

그림 3에서는 플라이휠의 구조와 그림 4에서는 플라이휠 저장장치의 동작개요를 나타내고 있다.

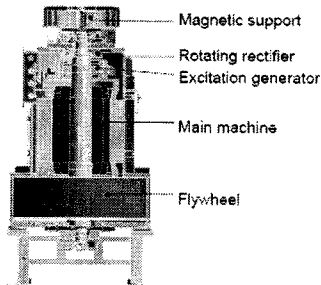


그림 3. 플라이휠의 구조

플라이휠 축전장치는 최근의 자석이나 윤활유등의 재료의 진화, 고속 모터나 반도체식 전력변환장치 등의 저가격화가 진행되는 것으로 전력회생용도의 분야에 있어서 에너지절약화의 가능성에 대해 높아지고 있으며, 전기화학 반응을 하는 2차 전지에 비하여 급속 충방전을 반복해도 화학적 노화가 없으며 긴 수명 및 야외의 온도환경에 따른 성능저하나 노화가 없는

장점이 있다. 또, 전기 이중층 캐패시터에 비교하여 에너지 밀도 및 전력밀도가 크고, 야외의 온도 환경에 따른 성능저하나 노화가 없는 장점이 있으나, 종래의 플라이휠 식의 과제에 있어서 다음과 같은 개선 과제를 포함하고 있다.

- 구르는 베어링 등의 피로보수 부품이 많다.
- 냉각장치 등의 부속기기를 필요로 한다.
- 비교적 무겁다.
- 고속회전시의 공기저항이 크다.
- 장시간 에너지 보존이 곤란하다.
- 외부진동에 따른 베어링용력의 완충 필요하다.
- 전력변환 제어를 필요로 한다.
- 안전대책이 필요하다.

또한, 플라이휠은 개발비용을 제외한 구입 비용만 25억~30억정도가 필요할 정도로 높은 비용이 요구된다.

4. 슈퍼캐패시터 에너지 저장시스템

Ultracapacitors 또는 Double-Layer capacitor라 불리는 Supercapacitors는 재래식 전해콘덴서와 신형 2차 전지가 갖지 못하는 영역에서 고유한 성능 특성을 가지는 차세대 회생 에너지 저장시스템으로, 전극과 전해질 사이에 형성되는 단위셀에 전극의 양단에 수볼트의 전압이 가해지면 전해액 내의 이온들이 전극장을 따라 이동하여 전극 표면에 흡착한 후 발생하는 전기 화학적 매커니즘에 의해 작동되는 에너지 저장 시스템이다.

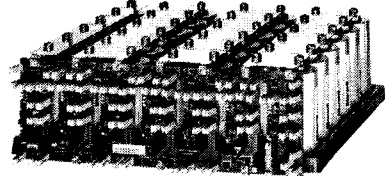


그림 4. 슈퍼캐패시터 Modules

기존의 콘덴서와 이차전지의 중간적인 특성의 슈퍼캐패시터는 환경친화적인 재료의 사용, 급속 충방전 특성 및 반영구적인 수명특성 등으로 전력전자에서 크게 각광받고 있다. 슈퍼캐패시터의 하나인 전기이중층캐패시터(EDLC, Electrical Double Layer Capacitor)는 기존 이차전지와는 달리 전기화학적인 반응이 아닌 전기 이중층에서의 charge separation에 의한 에너지 저장을 하므로 100,000 사이클 이상의 수명이 가능하며 급속 충방전 및 사이클 수명이 반영구적이다. 또한 폐기물이 거의 없어 환경친화적이라 할 수 있다.

하지만, 슈퍼캐패시터의 최대 해결해야 할 문제점중 하나는 에너지 밀도를 높이는 것이다. 구성 재료의 무게 최적화를 통하여 중량 감소에 의한 특성향상 연구 및 전극재료의 고용량화와 전극의 고밀도화 및 제조공정의 개선으로 에너지 밀도를 향상시키는 연구가 계속되어야 한다. 활성탄의 기공의 평균크기와 분포특성도 흡착이온의 이동도에 영향을 주어 출력특성과 밀접한 관계가 있으므로 전극재료의 특성을 제어하여 용도에 따른 차별화된 특성을 갖는 전극재료 개발 연구가 필요하다. 현재 일반적으로 사용되는 슈퍼캐패시터의 활성탄은 비표면적이 1500~3000m²/g 이며 평균 기공크기는 10~20Å 이 개발되어 사용되고 있다. 최근에는 비표면적은 낮으면서도 용량 특성은 향상된 비다공성 탄소재료의 출현으로 성능이 향상된 제품이 가능하게 되었다.

대용량 고효율의 응용으로 향후에는 전기자동차용이 그 주류를 이룰 것이라는 전망이 있으며, 순간적인 정전에 의한 피해를 줄이기 위한 UPS 에는 대용량의 전지보다는 저에너지 고효율 특성과 고전압화가 보다 용이한 슈퍼캐패시터의 적용이 검토되고 있다.

그리고, 현재 슈퍼캐패시터는 1.2MW급 에너지 저장장치를 설치하는데 3억~5억의 비용이 요구된다. 이는 플라이휠에 비하면 약 1/7수준에 불과하다.

5. 에너지 저장장치의 위치에 따른 분석

5.1 변전소에 에너지 저장장치가 설치될 경우

변전소는 2~3개의 역사 사이에 각각 1개씩 설치되어 있으며, 상행-하행선 모두 같은 모선을 사용하고 있으므로 변전소에서의 소비전력 및 회생전력을 측정함으로써 에너지저장장치의 설치 및 운용시의 경제성을 검토에 해보았다.

측정은 선릉 및 낙성대에서 수행하였으며 전력요금은 1kWh 당 90원으로 회생 에너지량을 산정하였다.

① 낙성대역

측정한 Data를 근거로 2~3개역에서 발생하는 회생 에너지의 활용도를 검토해본 결과 측정된 회생 에너지는 대략 15,464 [kWh]가 되었다.

- 1일 평균 회생 에너지량
= 15,464 [kWh] × 90원 = 1,391,760원
(변전소 모선을 기준)

- 1년 평균 회생 에너지량
= 1,391,760원 × 365일 = 507,993 천원

② 선릉역

선릉역에서의 측정된 회생에너지 = 20,155 [kWh]

- 1일 평균 회생 에너지량
= 20,155 [kWh] × 90원 = 1,813,950 원
(변전소 모선을 기준으로 측정데이터 19시간)

- 1년 평균 회생 에너지량
= 1,813,950원 × 365일 = 662,092 천원

5.2 차량에 에너지 저장장치가 탑재될 경우

측정한 서울도시철도공사 7호선 차량을 근거로 차량 탑재시 1편성 운행시의 경제성을 검토해 보았다.

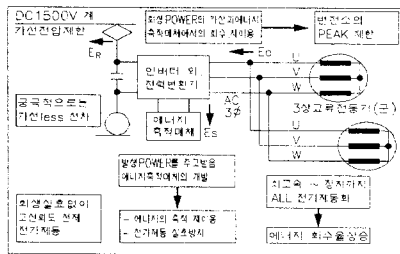


그림5. 차량에 탑재될 경우의 에너지 흐름

시간대는 승객이 많은 Rush Hour 시간대(2006년 1월 13일 18시 34분 ~ 2006년 1월 13일 20시 02분 57초)로 측정하였으며 1회 편도 소요시간은 약 1시간 30분을 기준으로 산출하였다. 또한 전력요금도 1kWh 당 90원으로 산정해 보았다.

① 운행 조건

- 평일, 주말의 운행시간을 평균하여 1일 평균 15시간 운행조건 (5 회 왕복조건)
- 월상감사 및 고장발생시 차량의 운행 예외조건을 감안하여 1달 평균 29일

② 차량 운행시 회생에너지 절감량

- 1편성 1회 편도 회생 에너지량 : 70,000 원
- 1일 평균 회생 에너지량 :
70,000원 × 10회 = 700,000 원
- 1달 평균 회생 에너지량 :
700,000원 × 29일 = 20,300,000 원
- 1년 평균 회생 에너지량 :
20,300,000 × 12달 = 243,600 천원

6. 결 론

지금까지의 결과를 정리해보면 플라이휠 방식은 중량이 크고 회전체이기 때문에. 기조를 튼튼한 것으로 할 필요가 있으며, 기기손, 풍손의 에너지 손해를 무시할 수 없다. 또한 슈퍼캐패시터에 비해 약 7배 정도 많은 설치 비용이 요구된다. 반면에 슈퍼캐패시터는 출력밀도가 높고, 급속 충방전이 가능하며 플라이휠은 유지보수시 적어도 몇 일이 걸려야 하나 Supercapacitor는 30분정도면 캐패시터 모듈을 교체할 수 있는 유지보수 편의성이 있다. 이러한 결과를 토대로 분석해보면 슈퍼캐패시터가 더 효율적 이익이 있고 차량 시스템 적합성에도 더욱 부합할 것처럼 보인다.

또한 에너지 저장장치의 설치 위치에 대한 분석을 정리해보면, 변전소 설치는 회생실효 대책으로서는 유효하지만, 가선저항과 가선전압 상한의 제약으로부터, 고속영역에서의 전기브레이크 파워 증가에 해당하는 전기 에너지를 회수하는 것은 불가능하다. 단, 회생되어지는 차량과 변전소에 설치된 에너지 저장장치와의 거리가 길면 가선선로의 임피던스 성분으로 인해 회생되는 전체의 에너지가 에너지 저장장치로 전달되지 못하는 단점이 있다. 반면, 차량탑재 에너지 저장방식은 에너지 저장매체에 해당하는 무게는 차량의 소비전력을 증가시키게 되며, 에너지 저장장치 설치시 증가되는 무게보다 저장, 활용되는 에너지 효율이 높아야 하는 문제점이 있지만, 가선거리에 상관없이 잉여파워를 차량탑재 에너지 저장 소자에 축적하면서, 최고속도로부터 제로속도까지, 상용 최대레이크를 회생브레이크만으로 처리하는 것이 가능하게 된다. 즉, 현재 상태에서의 가선의 설계변경과 추가공사를 행하지 않고, 고유손실(회로저항과 주행저항 등)에 영향 없이 전 운동 에너지를 전기에너지로 바꿔서 리사이클하는 것을 가능하게 할 수 있다.

지금까지의 연구결과들을 바탕으로 향후에는 도시철도 시스템에서 가장 적합한 에너지 저장시스템을 선택하기 위해서 플라이휠방식보다는 슈퍼캐패시터방식에 초점을 두어 에너지 저장시스템의 효율성을 더욱 높이기 위한 연구를 중점으로 진행하면서 이렇게 개발된 에너지 저장시스템의 효율적인 설치방식에 대해서도 연구·개발할 계획이다.

[참 고 문 헌]

- [1] Shedon A. Williamson, S. Chowdary Rimmalapudi, and Ali Emadi, "Electrical Modeling of Renewable Energy Sources and Energy Storage Device", JPE 4-2-7, pp 117-126
- [2] 한문섭, "전력계통의 동향", 한국철도기술, 01-02, 34-36, 2005
- [3] SIEMENS AG, "SITRAS SES, Energystorage system for mass transit systems", 2005
- [4] 김일환, 남경환, 김광범, "슈퍼캐패시터와 나노 소재 기술", NICE, 제21권 제4호, 2003
- [5] Joyelle Harris Jones, "Global Markets for Capacitors, Flywheels and SMES Systems : Emerging and Mature Technologies", Business Communications Company, Inc., 2006