



저작자표시-비영리-변경금지 2.0 대한민국

이용자는 아래의 조건을 따르는 경우에 한하여 자유롭게

- 이 저작물을 복제, 배포, 전송, 전시, 공연 및 방송할 수 있습니다.

다음과 같은 조건을 따라야 합니다:



저작자표시. 귀하는 원저작자를 표시하여야 합니다.



비영리. 귀하는 이 저작물을 영리 목적으로 이용할 수 없습니다.



변경금지. 귀하는 이 저작물을 개작, 변형 또는 가공할 수 없습니다.

- 귀하는, 이 저작물의 재이용이나 배포의 경우, 이 저작물에 적용된 이용허락조건을 명확하게 나타내어야 합니다.
- 저작권자로부터 별도의 허가를 받으면 이러한 조건들은 적용되지 않습니다.

저작권법에 따른 이용자의 권리는 위의 내용에 의하여 영향을 받지 않습니다.

이것은 [이용허락규약\(Legal Code\)](#)을 이해하기 쉽게 요약한 것입니다.

[Disclaimer](#)

2017年

2月

碩士學位論文

전기철도차량

회생전력

에너지

저장시스템

에 관한 연구

金

振

奭

2017年 2月
碩士學位論文

전기철도차량의 회생전력 에너지 저장시스템에 관한 연구

朝鮮大學校 産業技術融合大學院

電氣技術融合工學科

金 振 奭

전기철도차량의 회생전력 에너지 저장시스템에 관한 연구

A Study on the Regenerative Energy
Storage System for Electric Railway Vehicle

2017 年 2 月 24 日

朝鮮大學校 産業技術融合大學院

電氣技術融合工學科

金 振 奭

전기철도차량의 회생전력 에너지 저장시스템에 관한 연구

指導教授 金 南 勳

이 論文을 工學 碩士學位 論文으로 提出함.

2016年 11月

朝鮮大學校 産業技術融合大學院

電氣技術融合工學科

金 振 奭

金振奭의 碩士學位論文을 認准함

委員長 朝鮮大學校 教授 李 愚 宣 印

委 員 朝鮮大學校 教授 金 容 載 印

委 員 朝鮮大學校 教授 金 南 勳 印

2016年 11月

朝鮮大學校 産業技術融合大學院

목 차

ABSTRACT

I. 서 론	1
II. 이론적 고찰	2
A. 직류 급전시스템	2
1. 정류기	4
2. 정류기용 변압기	7
B. 회생에너지 제어시스템	8
1. 회생에너지 발생원리	8
2. 회생에너지 제어방식	12
3. 회생에너지 저장방식에 따른 구분	15
III. 실험 및 결과고찰	21
A. 광주도시철도 회생에너지량 측정 및 분석	21
B. 전동차량 종합제어장치를 통한 전력량 측정	23
C. 연간 소비전력량 및 회생전력량 분석	25
IV. 결론	28

Reference

표목차

표 1 정류기의 부하조건별 전압강하	6
표 2 이차전지의 비교	17
표 3 캐패시터 특성 비교	20

도목차

그림 1 직류 급전시스템 구성도	3
그림 2 실리콘 정류 소자의 특징	4
그림 3 정류기용 변압기 및 정류기 결선	4
그림 4 정류기의 결선 방법	7
그림 5 역행/제동시 주회로	9
그림 6 전동기 속도-토크 그래프	9
그림 7 회생에너지 제어시스템 구분	11
그림 8 회생초퍼저항기시스템(제동초퍼제어기장치)	13
그림 9 회생인버터를 사용한 급전시스템	14
그림 10 회생 에너지 저장 시스템 개념도	15
그림 11 리튬이온 이차전지 구조 및 충·방전 원리	16
그림 12 플라이휠 에너지 저장장치 구성도	18
그림 13 슈퍼캐패시터의 동작원리	19
그림 14 교류 출력전압 및 직류 인입전압	21
그림 15 월별 회생에너지 전력량(kWh)	22
그림 16 전동차 열차종합제어시스템에 의한 역행 전력량 측정 ...	23
그림 17 전동차 열차종합제어시스템에 의한 회생 전력량 측정 ...	24

그림 18 광주광역시 마륵변전소 수배전반	25
그림 19 광주광역시 마륵변전소 수배전반	26
그림 20 광주광역시 도시철도 변전소별 연간 전력사용현황	27

ABSTRACT

A Study on the Regenerative Energy Storage System for Electric Railway Vehicle

KIM JIN SEOK

Advisor : Prof. Nam Hoon Kim, Ph.D.

Electrical Engineering Technology
Convergence

Industrial Technology Convergence

Graduate School of Chosun University

With the aim of preventing global warming, the Tokyo Protocol, which was adopted in 1997, has become an active part of energy conservation and reduction. In the automobile industry, development of electric vehicles and fuel cell vehicles, as well as development of power storage media such as driving power source and backup power source, have been made considerable progress. On the other hand, in the railroad industry, the electric power storage device is applied as a power source for driving a vehicle, which is represented by a tram line tram, and a power storage device using various electric power storage media for the purpose of voltage reduction measures, Has been put to practical use. Power energy is highly controllable, used for various purposes, and has a variety of uses because of its clean nature. However, because electric energy has the characteristics of production and immediate consumption, it is necessary to

have a sufficient supply capacity for the maximum demand electric power for stable supply. Even in the case of electric railways, peak power is large at the time of rush hour, so even if the average load ratio (the ratio of the load power to the electric power facility capacity) is low, it is a factor of the electric power rate increase. In addition, with the introduction of large-capacity new vehicles, the need for efficient use of regenerative energy and countermeasures for line voltage compensation is increasing, and the application of power storage devices can sufficiently cope with these problems. In the case of existing domestic railway vehicles, the regenerative energy generated when braking or decelerating is directly converted to the electric power of the electric cable, which directly affects the electric line. If the voltage exceeds the predetermined voltage range, the regenerative braking battery is used. And thus losses are generated. Therefore, it is urgently necessary to secure the technical ability to store the instantaneous regenerative energy generated in deceleration of the electric motor in the electric power storage medium, to convert the energy into electric energy when necessary, and to improve the efficiency of the energy storage device. This paper focuses on efficient storage method of regenerative energy and analysis of energy storage media in domestic and foreign countries, and examines economic feasibility by applying it to domestic railway industry. Through this, we will create an opportunity to utilize electric power efficiently not only in the railway industry but also in general industry.

I. 서론

지구온난화의 방지 대책을 목적으로 1997년에 의결된 교토의정서의 발효 등을 계기로 에너지 절약 및 절감에 대해 관심이 높아지고 있다[1]. 자동차 산업에서는 이미 전기 자동차 및 수소연료 전지차 등의 개발 및 구동용 전원과 백업용 전원 등 에너지 저장 매체에 있어 상당한 발전을 이루고 있다[2-3]. 또한 철도 산업에서는 차량 구동용 전원으로서 전력 저장장치를 무가선티램에 적용하였고, 지상 측에서는 변전소의 보완으로 전압강하 및 회생 실효방지 대책 등을 목적으로한 각종 전력에너지 저장 장치의 적용이 실용화 및 보편화 되고 있다[4-6].

전력 에너지는 제어성이 높으며 다양한 용도로 사용되며 깨끗한 성질 때문에 그 용도가 다양하다[7]. 하지만 전기 에너지는 생산과 동시에 즉시 소비라고 하는 성질 때문에 안정적인 공급을 위해서는 최대 수요전력에 대하여 충분한 공급력을 가지는 설비가 필요하다[8-9]. 전기철도에 있어서도 출퇴근때 피크 전력이 높기 때문에 평균 부하율이 낮아도 전력요금 증가의 요인이 되고 있다[10].

또한 대용량 신형 차량의 도입에 있어 가선티압 보상대책의 필요성이 높아지고 있으며, 회생 에너지의 유효이용과 전력 저장장치의 적용은 기존 과제의 해결 방안으로 충분히 대응 가능하다[11-13]. 기존 국내 철도차량의 경우엔 제동 및 감속시에 발생하는 회생에너지는 전차선 전원으로 환원되어 가선에 직접적인 영향을 주며 정해진 정상적인 전압범위를 넘어서게 되면 회생제동 시스템이 정지하여 기계적 마찰제동에 의해 열로 소비되는 방식으로 손실이 발생되고 있는 실정이다[14-15]. 따라서 전동차의 감속시 일시적으로 발생하는 회생에너지를 전력 저장매체에 저장하고, 필요시 전기 에너지로 변환하여 사용 가능한 기술력 확보와 에너지 저장장치의 효율을 극대화하는 방안이 절실히 필요하다[16]. 본 논문에서는 국내외의 에너지 저장매체의 분석을 통한 회생에너지의 효율적 저장방법 및 활용에 초점을 맞춰 철도시스템에 적용하여 경제적 타당성 및 효율성을 검토하고자 한다. 이를 통하여 철도 산업뿐 아니라 다방면의 산업 분야에서도 효율적인 전력 활용의 계기를 마련하고자 한다.

II. 이론적 고찰

전기철도는 교류 급전시스템과 직류 급전시스템 등으로 구분되며, 교류 급전시스템의 경우 상대적으로 대전력의 원거리 송전방식이 가능하며, 에너지 효율이 높아 장거리 수송선로에 주로 사용하고 있다. 반면 직류 급전시스템은 통신상 장애가 없으므로 상대적으로 낮은 전압을 사용하여 절연 이격거리가 짧아 구조물의 터널단면을 효율적으로 줄일 수 있는 장점이 있다[17-19].

국내의 서울, 부산, 대전, 광주, 대구, 인천 등 광역도시철도 내 공급방식은 직류 급전시스템 방식이며, 교외구간과의 연계운전을 위해 경부선, 안산선, 경인선, 과천선, 분당선 등은 교류방식이다[20]. 국내에서는 지하철의 지하구간에서 주로 사용되며, 정류설비를 통해 전압 1500[V]를 사용하고 있으며, 현재 운영 및 공사 중인 전기철도의 경우 750[V] 전압을 사용하고 있다. 교류 방식은 AC 단상 25,000[V] 시스템으로 운영되고 있다[21].

본 논문에서는 회생에너지 저장시스템 구성 및 양방향 컨버터의 선정 및 구성등을 위해 직류 급전시스템의 시뮬레이션을 수행하였다. 따라서 직류 급전시스템을 구성하는 직류 전력변환설비 측면에서의 성능을 검토해보려 한다.

A. 직류 급전시스템

전기철도의 급전시스템은 직류전철 변전소에서 급전거리, 전압강하, 유지 보수 등을 고려 전차선로를 적절한 구간으로 나눠 급전과 정전이 가능한 전기적인 계통 구성을 말한다. 직류 급전계통은 전압강하, 보호 계전기의 가선 범위 및 보호범위 등과 관련하여 고려되어야 할 중요한 요인 중 하나이다 [22-23]. 전기철도 급전계통은 일반적인 전력계통 시스템에과는 다른 특성이 있다. 전기철도의 동력차량의 전기가 정전이되면 열차의 운행이 정지하므로 신뢰성 및 안정적인 전원설비가 요구된다. 전기철도의 부하는 일반적으로 전

동차 특 성상 기동 및 정지가 빈번하게 이루어지고 그 위치가 변하기 때문에 부하의 크기 및 시간적 변동 폭이 극히 심하며, 또한 전동차에 대한 전력의 공급은 전차선 및 집전 장치의 접촉에 의존하는데 고속 운전 동안에도 양호한 상태를 유지하여 안정적으로 우수한 품질의 전력을 공급 할 수 있어야 한다[24-26].

직류급전 방식의 변전계통 구성으로는 변전소(SS), 급전구분소(SP), 급전 타이 포스트 등이 있다. 직류 전기철도 급전변전소는 한전변전소의 22.9[kV]를 모선으로부터 수전하여 전동차 급전을 위한 표준전압(도시 철도 : 1,500[V], 경전철 : 750[V])으로 변환하여 공급 한다. 그림 1은 일반적인 직류 급전시스템의 구성도를 나타내고 있다.

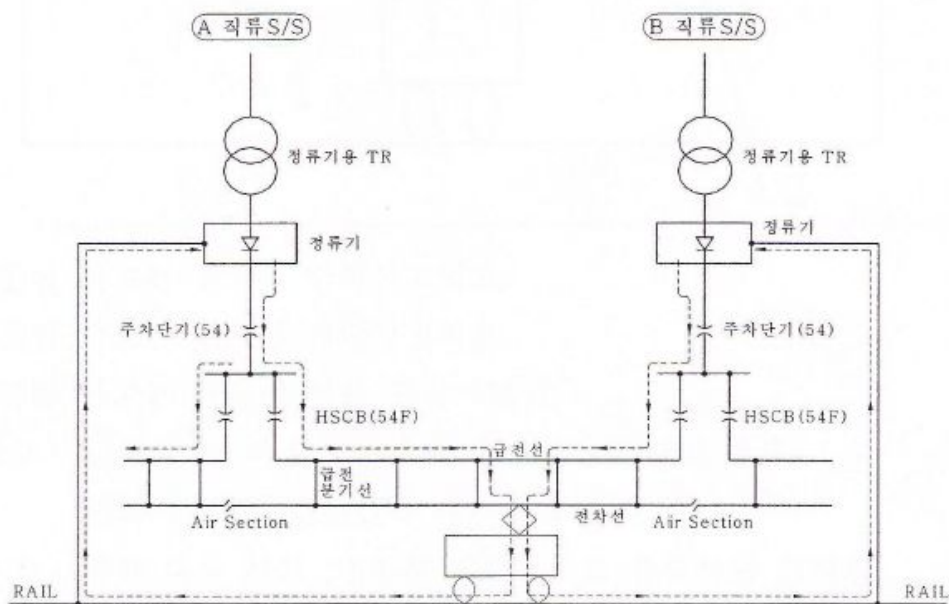


그림 1 직류 급전시스템 구성도

1. 정류기

직류 급전시스템의 정류기는 실리콘 전력 다이오드를 사용하여 교류전력 (AC Power)을 직류전력(DC Power)으로 변환하기 위한 전력변환기며 소자의 특성상 단방향으로만 도통이 가능하다. 실리콘 다이오드 정류기는 구조 및 수급이 용이하여 보수나 운전이 간편하며 또한, 냉각 특성 및 소형 경량화로 우수한 전기적 특성과 저렴한 가격으로 인해 다수의 직류 급전시스템에 사용되고 있다.

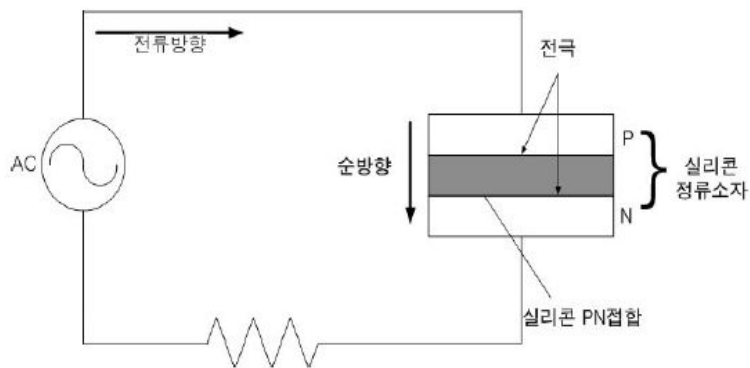


그림 2 실리콘 정류 소자의 특징

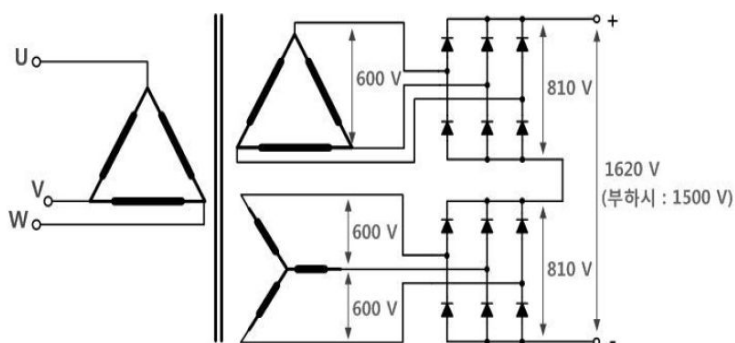


그림 3 정류기용 변압기 및 정류기 결선

그림 3은 수전된 3상 22,900V 교류전원이 Δ - Δ , Δ -Y 결선된 3권선 변압기를 통하여 출력파형이 30° 의 위상차를 가지도록하며, 정류기용 변압기 2차측에 전파 정류기 2개를 통해 직렬 연결하여 12펄스의 직류 급전 전압을 형성하는 시스템을 보여준다. 그림 3에서와 같이 실리콘 정류기는 정류기용 변압기 2차측의 교류 전압의 입력으로부터 직류 전압측으로 출력을 보내므로 직류단자 전압은 맥동 전압의 평균치를 나타내며, 따라서 출력전압 V_{DC} 는

$$\begin{aligned} V_{DC} &= \frac{3}{\pi} \int_{\frac{\pi}{3}}^{\frac{2\pi}{3}} V_m \cos \theta d\theta \\ &= \frac{3}{\pi} V_m \\ &= \frac{3\sqrt{2}}{\pi} V (\because V_m = \sqrt{2} V) \\ &= 1.35 V \end{aligned} \quad (1)$$

의 관계가 성립된다. 즉, 1회로의 3상 전파 정류기의 직류 전압은 3권선 변압기 2차측의 교류 전압 실효치에 대해 1.35배이며 정류기의 직류 출력전압을 1500[V]로 하기 위해서는 교류 입력전압을 식 1에 의해서 1111[V]가 되어야 하나, 정류기의 직류 1500[V] 출력은 전부하시의 전압이며 무부하시의 전압은 이보다 높게 될 것이다. 또한 부하전류는 변압기의 2차 권선 및 정류기를 통해 흐르므로 변압기와 정류기의 저항과 리액턴스에 의해 전압강하가 발생함을 고려하여야 한다. 전부하시에 정류기의 정격 전압을 1500[V]로 유지하기 위해서는 변압기 2차측의 단자 전압을 전압 강하보다 높게 해야만 한다. 정류장치의 전압 강하는 정류기 소자의 직·병렬 개수, 변압기의 임피던스 등에 의해 결정되므로 정류 장치의 제조사에서 제시되어야 한다. 일반적으로 이용되고 있는 정류기의 부하조건별 전압강하는 표 1과 같다.

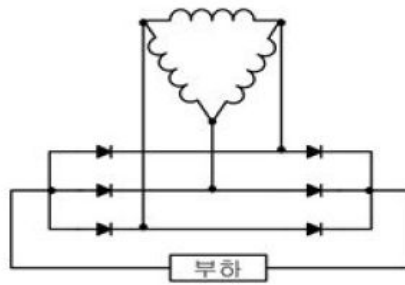
표 1 정류기의 부하조건별 전압강하

종류	정류기의 부하조건	전압강하
D	정격출력에서 연속 정격출력의 150%에서 2시간 정격출력의 300%에서 1분	6%
E	정격출력에서 연속 정격출력의 120%에서 2시간 정격출력의 300%에서 1분	8%

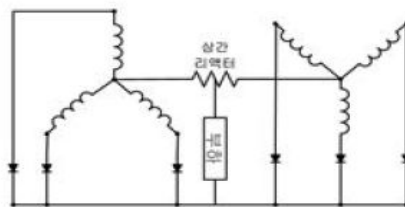
직류 급전시스템은 Δ - Δ , Δ -Y 결선된 3권선의 정류기용 변압기와 연결되어 30°의 위상차를 가진 12펄스 직류 전과 정류기 2개의 직렬 조합을 하나의 군으로 형성하여 2군의 상시운영과 1군의 예비, 총 3군으로 이루어져있다. 12펄스 정류시스템은 6펄스 정류에 비하여 리플이 적으며 6펄스 정류시 발생하는 고조파를 상쇄시켜 제거하므로 6펄스 정류방식에 비해 중합 왜형률 측면에서 우수한 특성을 가지므로 현재 12펄스 정류 방식이 가장 보편적으로 사용되고 있다. 직류 급전시스템 정류기 결선방식은 보통 3상 브리지(Bridge) 결선방식과 2중 성형결선의 2가지 방법이 사용된다.

브리지 결선의 정류기에서는 1상의 정류기 소자 전체로 인가된 상시 역내 전압은 정류기용 변압기의 2차측 선간 전압의 1/2이 되고, 2중 성형결선의 경우에는 정류기용 변압기의 상전압과 같다. 또한 전류는 2중 성형결선의 경우에는 상시 두개의 상에 전류가 병렬로 흐르지만 브리지 결선의 경우에는 두개의 상에 직렬로 전류가 흐르므로 하나의 상에 흐르는 전류는 두배가 된다.

결선방식에 따라 정류기 소자에서의 전압 및 전류의 차이로 직류 1500[V] 이상급의 정류기에서는 주로 브리지 결선방식을 채택하여 사용하고 있으며, 직류 750[V]급의 정류기에서는 주로 2중 성형방식을 대부분 사용하고 있다.



(a) 3상 Bridge 결선



(b) 2중 성형결선

그림 4 정류기의 결선 방법

2. 정류기용 변압기

정류기용 변압기는 수전된 3상 22,900[V]의 교류전압을 다상의 교류전원으로 변환하여 직류변환장치에 입력하는 방식의 교류전력 변환장치이다. 정류기는 3상 브리지 결선이므로 정류기용 변압기 2차측 각 상의 권선에는 교류전류 반파 중 $2\pi/3$ 동안만 정류기로 전류가 흐른다. 직류 전류의 한주기 평균값을 I_d 라 하면 교류 실효치 I 는 식 2와 같이,

$$\begin{aligned}
 I &= \sqrt{\frac{1}{\pi} \int_0^{2\pi} \langle I_D \rangle^2 d\theta} \\
 &= \sqrt{\frac{\langle I_D \rangle^2 \times \frac{2\pi}{3}}{\pi}} \\
 &= \sqrt{\frac{2}{3} \cdot \langle I_D \rangle}
 \end{aligned} \tag{2}$$

국내에서는 보편적으로 3,000~4,000[kW]급의 정류기를 주로 사용한다.

B. 회생에너지 제어시스템

1. 회생에너지 발생원리

회전자가 전기적으로 닫힌 회로로 구성되어 있으며 보통 회전자계에 의해 발생한 회전자 도체속의 기전력에 의해 전류를 흘려서 전동기로서 회전하는 방식이다. 회전자의 회전 방향은 고정자의 회전자계의 회전 방향에 추종하지만, 완전하게 일치 할 수는 없다. 이 불일치한 부분을 슬립이라하며, 슬립은 유도전동기의 동작 특성에 있어 매우 중요한 제어요소가 된다. 전동차의 역행 시 회전자에 부하가 걸리게 되면 회전자계보다 조금 늦게 회전자가 회전하게 되며, 회생제동시는 회전자속이 약간 빨리 회전하게 된다. 고정자인 회전자계의 회전주파수를 f_1 (Hz), 실제의 회전자의 회전주파수를 f_m (Hz)이라 하며 다음 식 3의 관계가 성립한다.

$$\begin{aligned} f - f_m &= f_1 \\ \frac{f_1 - f_m}{f_1} &= S \end{aligned} \quad (3)$$

여기서, f : 슬립주파수 f_1 : 회전자계의 회전주파수
 f_m : 회전자의 회전주파수 S : 슬립률
 (회생시 $f_1 < f_m$ 에 의해 $f < 0$, $S < 0$)

역행시 자기장 속에서 회전자에 유도 전류가 흐를 시 자속과 전류의 직각 방향으로 힘이 작용하여 모터가 전동기로서 작용하게 되며, 또한 제동시 자기장속에 회전자가 자속을 끊는 방향으로 움직일 때 회전자에 역기전력이 발생하여 전동기의 단자 전압을 증가 시키는 요인이 된다. 이때 전동기의 높아진 단자 전압으로 인하여 회생전력이 가선쪽으로 향하게 된다.

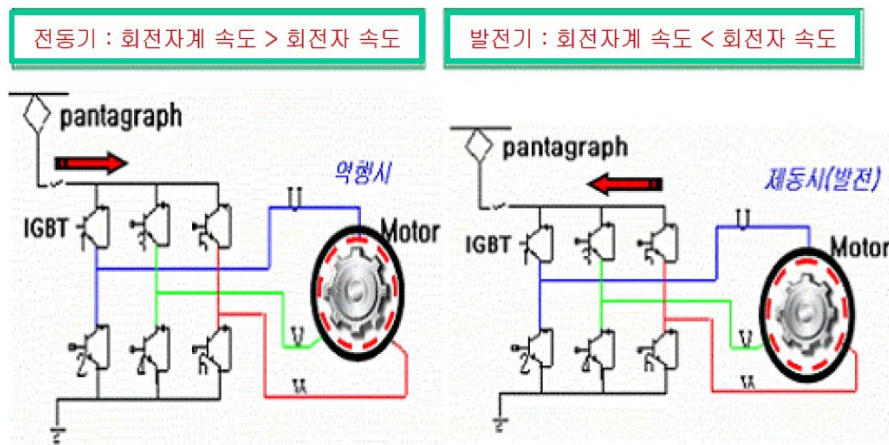


그림 5 역행/제동시 주회로

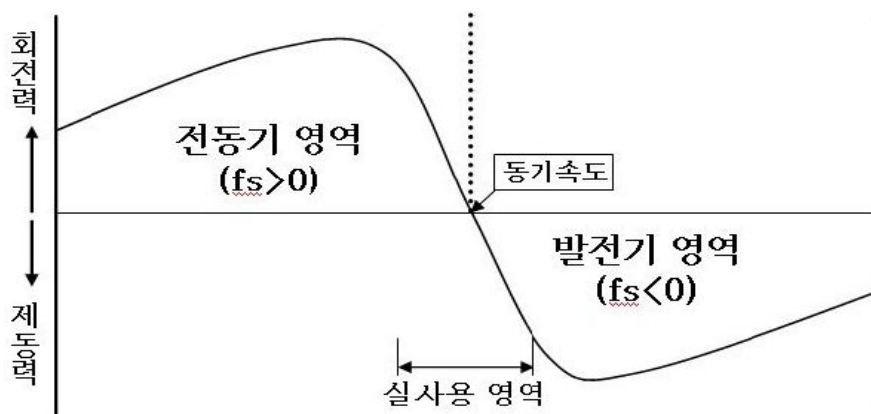


그림 6 전동기 속도-토크 그래프

회생에너지를 전차선에 공급시 전동차 회생제동에 의해 발생된 에너지는 그림 5에서 보는 바와 같이 전차선으로 회귀된다. 전동차의 회생제동에 의해 발생하는 에너지를 제어하기 위해 제어시스템은 설치 방법에 따라 지상장치와 차상장치로 구분되며 또한 각각의 경우에 설치되는 장치의 교류전력계통에 연계하여 역송하는 방식, 직류 급전시스템의 연계 특성에 의해 저항으로 소비되는 방식, 에너지 저장장치에 저장하여 역행차에 공급하는 방식으로 구분되어 진다. 에너지 저장장치와 전력변환설비의 개발의 다양화로 회생에너지 제어설비시스템의 형식을 다양하게 구현할 수 있다. 그림 6에서와 같이 회생제동은 감속시 기계적 마찰을 수반하지 않는 비접촉 제동이기 때문에 열을 발생시키지 않으므로 마모분진이 발생하지 않아 친환경적이며 에너지 절약적인 제동 시스템이다. 가선으로 되돌린 회생에너지는 다른 전동차를 가동하기 위한 에너지로 사용된다. 그러나 감속하는 전동차 부근에 다른 전동차가 운행하고 있지 않는 경우 그 에너지는 소비되지 않고 가선전압을 상승시키므로 회생제동의 기능이 상실된다. 그러므로 차량은 기계적으로 마찰 브레이크를 가동하여 정지해야 하므로 에너지를 회수할 수 없게 되며, 나아가 제동관련 부품의 소모나 열화도 함께 일어나게 된다. 본 논문에서는 국내외에서 대표적으로 사용 및 적용되고 있는 시스템에 대해 검토보고자 한다. 회생에너지 제어시스템 장치의 설치 위치에 관해서는 전동차량에 탑재하는 방법과 변전소 또는 역과 역 구간사이에 설치하는 방법이 있으며, 각 위치에서 회생되는 에너지를 최적으로 제어하기 위한 시스템적 방안이 활발하게 연구되고 있다.

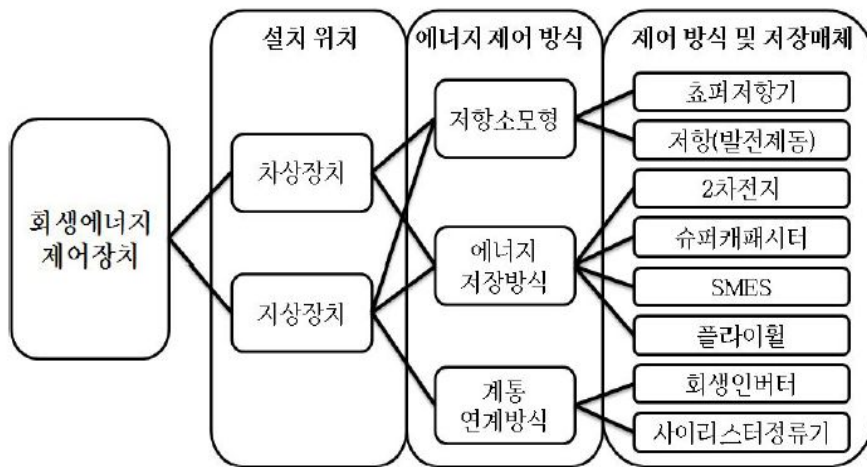


그림 7 회생에너지 제어시스템 구분

차량에 회생에너지 제어시스템 장치를 탑재할 경우 가선 거리에 상관없이 회생에너지를 차량에 탑재하여 제어장치를 통해 처리하면서, 최고 속도에서 영속까지 최대 브레이크를 회생브레이크로하여 전기적 제동력으로 처리하는 것이 가능하게 된다. 또한, 가선의 설계 변경 및 추가 설비의 증설이 필요없으며 고유 손실에 관계없이 운동에너지를 전기에너지로 변경하는 것이 가능하다. 하지만 회생에너지 제어시스템 장치의 무게가 차량의 무게를 증가시킴으로 소비전력 또한 증가시키기 때문에 회생에너지 제어시스템 장치의 차량 탑재 적용 시 증가하는 무게에 대한 에너지 효율을 고려해야 한다.

국내 도심철도의 경우 회생에너지는 차량 내부에서 저항을 통해 소실되고 있는 실정(발전제동)이며, 회생에너지를 재활용 및 저장하기 위해서는 설비를 추가해야 하나 설치위치와 공간상의 제약으로 인하여 기존운영중인 차량에 적용하기에는 많은 어려움이 예상된다. 지상에 회생에너지 제어시스템 장치를 설치하는 조건은 3가지로 분류할 수 있다. 역사 내에 설치하는 경우, 역과 역 사이에 설치하는 경우, 변전소에 설치하는 경우로 분류할 수 있다. 역과 역 사이 및 역사 내에 회생에너지 제어시스템 장치를 설치할 경우 전동차의 저속영역에서부터 고속영역까지 전반적으로 회생에너지를 제어하기 위하여

가선부분에서 회생에너지 제어시스템 장치까지의 별도의 전력설비증설이 필요하게 된다. 이는 부수적인 전력변환설비 및 전원 절환 제어기의 추가를 의미하며 부가적인 비용 상승으로 인한 경제성 검토가 요구된다.

회생에너지 시스템 설비를 변전소에 설치할 시 부가되는 전력변환 설비를 최소화 할 수 있으며 설비의 증설 및 유지·보수 관리에 유리하나 차량이나 역과 역 구간 사이에 설치되는 설비의 용량이 증가하는 단점이 있다.

2. 회생에너지 제어방식

a. 저항소모형

발전 제동 : 국내 도시철도 도입 초기시 직류직권 전동기를 적용한 저항 제어 차량의 속도를 감속시키기 위한 방법 중 하나인 발전제동은 주전동기를 발전기로 작용시켜 전동차가 가지고 있는 운동에너지를 전기에너지로 변환시켜 저항기를 통하여 열 에너지로 변환하여 제동력을 얻는 방식이다. 발전 제동은 차량 제동시의 회생에너지를 저항을 통하여 소모하며 회생전력이 전력 변환설비, 전차선등에 미치는 영향을 최소화 할 수 있으며 저항에서 발생된 열을 식히기 위한 냉각설비가 필요하다.

초퍼저항기 : 초퍼와 저항기로 구성된 회생초퍼 저항기는 변전소 및 차량에 설치하여 발생하는 잉여회생전력으로 가선전압 상승시 회생초퍼에서 통전 전류의 양을 조절하고 부하단 저항에서 회생 전력을 소모시킨다. 또한 회생 초퍼는 스위칭 소자의 도통시간을 조절하여 회생전력의 소비량을 조절할 수 있으며 회생저항 초퍼를 차량에 탑재된 형태로 그림 8과 같으며 역행차가 있는 경우, 정류기가 운전하여 역행차에 전력을 공급하지만 회생저항초퍼는 동작하지 않고 대기하다 회생차가 있는 경우 회생저항초퍼의 동작전압 도달시 회생저항초퍼가 동작하여 저항에 회생전류를 통전하고 열로 소비되어진다. 이 시스템 또한 저항기에서 발생하는 열을 식히기 위한 냉각시설이 필요하다.

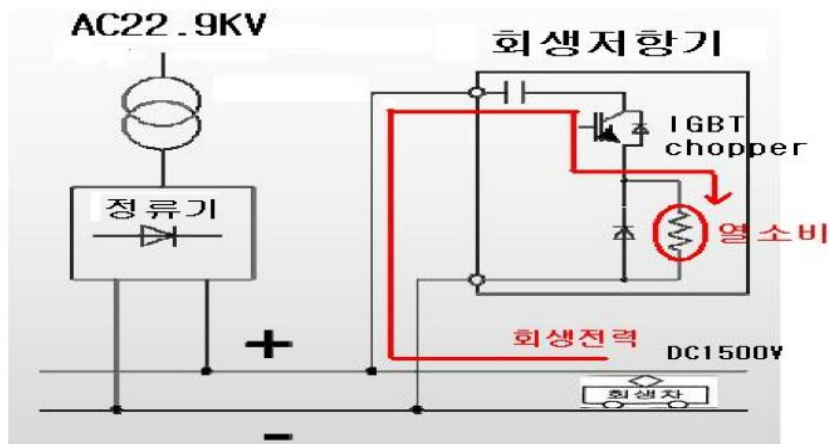


그림 8 회생초퍼저항기시스템(제동초퍼제어장치)

b. 계통연계방식

회생인버터 방식 : 선행 전동차의 회생제동시 후속열차가 없을 경우 소비되지 않는 잉여 회생전력을 다시 교류 전원으로 보내어 재활용하기 위한 방법으로는 전력용 반도체를 활용한 전력변환장치를 사용하여 발생하는 잉여 회생전력인 직류 전력을 교류 전력으로 변환하여 교류 급전단으로 반환하여 회생시키는 시스템이다. 이러한 회생인버터를 변전설비에 설치하여 에너지를 재활용하여 전동차의 성능 향상 및 에너지 절감에 기여한다.

일본에서는 회생인버터 방식을 몇 개의 노선에 설치하여 운용 중이며 국내의 경우 서울 지하철 9호선, 인천신공항내 순환 경전철, 광주지하철, 부산반송선 등에서 실리콘 다이오드 정류기와 회생인버터로 구성되어 교류계통과 연계 사용하고 있다. 직류모선의 잉여분 회생에너지를 교류모선으로 전달하는 방식의 회생인버터를 사용하고 있는 도시철도 시스템의 개념도를 그림 9에서 보여주고 있다. 그림과 같이 회생인버터는 정류기와 병렬로 연결되어 근처의 역행 차량에 의해 소비되지 않는 잉여 회생전력인 직류 전력을 교류 3상 전력으로 변환하여 교류 급전단으로 반환시킨다.

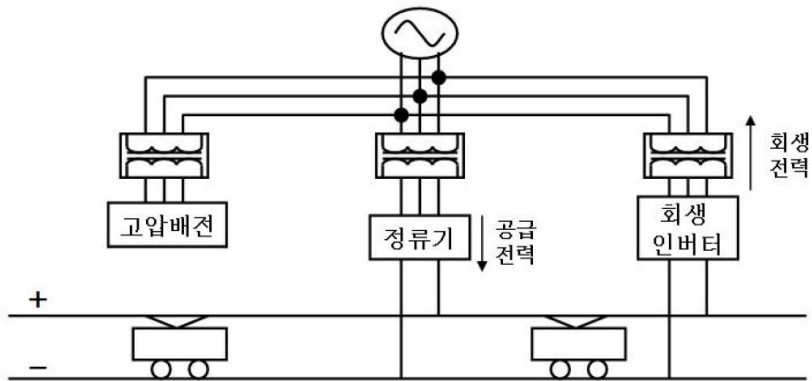


그림 9 회생인버터를 사용한 급전시스템

사이리스터 정류방식 : 전력변환 소자로 사용하는 정류기에 의해 에너지를 회생시킬 수는 정류 방식이 있다. 이러한 방법은 사이리스터의 위상각 조절을 통해 출력 전압을 조정하여 전동차의 사용 전압 조정이 용이하여 열차의 정시운전을 할 수 있는 장점을 가지며, 전력변환 제어장치로 인해 설비의 복잡화와 운전에 유의하여야 한다. 또한 위상제어를 통해 발생하는 고조파 억제를 위하여 고조파 필터를 설치해야만 한다. 직류 급전시스템에서는 교류 모선에 정류기를 통해 직류모선에 공급되는 전력에 비해 직류모선에서 인버터를 통하여 교류 모선으로 회생되는 전력이 작기 때문에 회생인버터 설비를 별도 시설하는 것이 유리하다.

c. 회생에너지 저장방식

직류 급전시스템에서 변전소 내 회생 인버터가 전차선에서의 잉여 에너지를 교류 전원측에 전기 에너지 형태로 반환되는 것과 달리 회생 에너지 저장 시스템은 크게 슈퍼캐패시터, 플라이휠, 2차전지 등에 저장하며 필요시 방출하여 전동차 운전전력으로 사용하는 시스템으로 구성되어진다.

특히, 신재생에너지 전력시스템을 활용한 대용량 저장장치 개발과 스마트 그리드, 전기자동차의 동력으로 사용하기 위한 2차전지의 기술개발을 통해 도시철도 분야의 회생에너지 저장장치의 개발이 활발하게 진행되고 있다. 그림 10는 회생에너지 저장시스템의 전력 흐름도를 나타낸다.

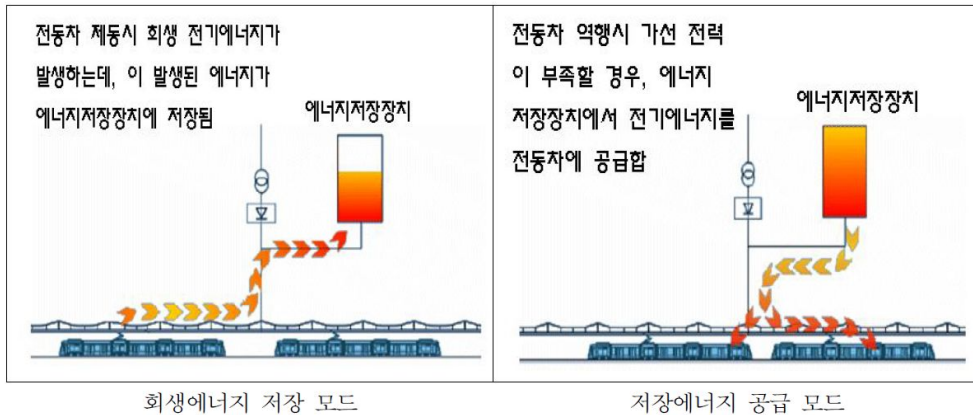


그림 10 회생 에너지 저장 시스템 개념도

3. 회생에너지 저장방식에 따른 구분

a. 이차전지 에너지 저장방식

전지는 일차전지와 이차전지로 구분 되며, 일차전지는 망간 건전지를 비롯해 이산화망간 리튬전지, 알카라인 전지 등 1회의 방전만이 가능하며 충전으로 재생할 수 없는 전지를 말한다. 또한, 이차전지는 외부 전원에 의해 공급받은 전류는 양극과 음극 사이에서 물질의 산화 환원 반응을 일으키는 과정에서 생성된 전기에너지를 화학에너지로 변환 저장하고, 이를 다시 전기 에너지로 충전 및 방전하는 과정을 반복할 수 있는 화학전지의 일종이다. 즉, 이차전지는 화학전지 중 반복적인 재충전 과정을 거쳐 여러 번 충전 가능한 전지라고 할 수 있다. 현재 대표적인 이차전지로는 연축전지, Ni-Cd, 리튬이

은, 리튬이온 폴리머, 나트륨유황 전지, 니켈카드뮴, 니켈수소 이차전지 등을 들 수 있다. 그림 11은 리튬이온 이차전지 구조 및 충·방전 원리 구성도를 나타낸다.

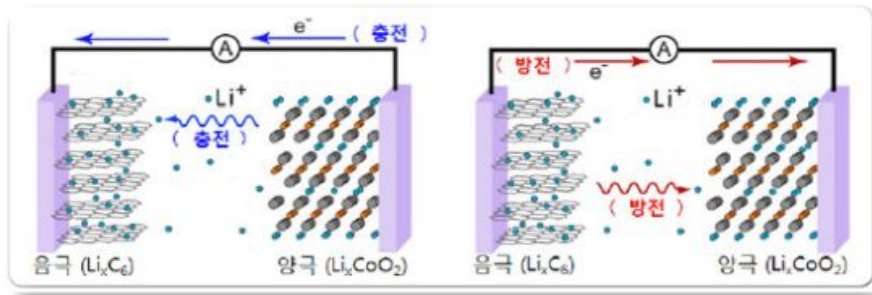


그림 11 리튬이온 이차전지 구조 및 충·방전 원리

이차전지는 고효율 방전특성 및 전압 평탄성, 우수한 저온 특성 등의 장점을 가지고 있다. 또한 전극은 방전상태 이전의 화학적인 상태로 되돌아 가기 위해 전류의 방향을 반대로하여 전원에 연결하면 에너지 저장이 가능하게 된다.

표 2는 이차전지의 종류에 대해 비교 설명하였다.

표 2 이차전지의 비교

특 성	Ni/Cd전지	Ni/MH전지	LIB (Li-Ion Battery)	LIPB (Li-IonPolymer Battery)
양극활물질	NiOOH	NiOOH	LiMO ₂	LiMO ₂
음극활물질	Cd	MH	Carbon	Carbon
전해액	KOH/H ₂ O	KOH/H ₂ O	LiX/유기용매	LiX/고분자전해질
평균전압(V)	1.2	1.2	3.7	3.7
제작당 에너지밀도 (Wh/L)	160	240	300~350	250~300
수명(회)	1000	1000	1200	1000
자기방전율 (%/월)		20~25	<10	≪10
환경친화도	Bad	Bad	Good	Good
저온특성	Good	Good	Good	Bad

b. 플라이휠 에너지 저장방식

플라이휠 에너지 저장장치는 잉여의 전기 에너지를 원판의 회전체를 돌려 회전 운동 에너지 상태로 저장하여 필요시 회전에너지가 저장된 회전체로부터 발전기를 가동시켜 전기를 발생시키는 장치이며, 또한 플라이휠 시스템은 많은 에너지를 짧은 시간내에 순간적으로 저장하고 이를 활용할 수 있는 무공해, 긴수명, 고효율의 친환경 에너지 저장방식으로 유럽에서는 친환경 교통수단의 차세대 동력원과 국방용 등의 분야에 있어 활발하게 연구가 진행되고 있다. 플라이휠 에너지 저장시스템은 에너지 저장을 위한 플라이휠 로터와 공기마찰을 최소화 하기 위한 진공 시스템, 플라이휠의 구동 및 발전을 위한 Motor와 Generator, 지지부의 접속마찰로 인해 에너지 손실을 저감하기 위한 초전도 및 자기 베어링 그리고 고효율 에너지 입출력제어부로 구성되어 진다.

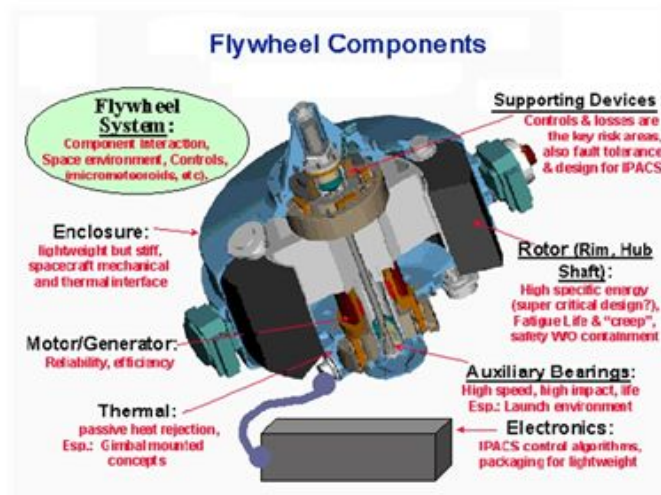


그림 12 플라이휠 에너지 저장장치 구성도

c. 슈퍼 캐패시터 에너지 저장방식

울트라 캐패시터(Ultracapacitor) 또는 전기 이중층 캐패시터라 불리는 슈퍼 캐패시터는 전해 콘덴서 및 신형 2차 전지가 가질 수 없는 영역에서 고유한 특성을 가진 차세대 회생 에너지 저장 시스템으로 알루미늄 전해 커패시터에 비해 대용량 에너지 저장이 가능하며 고출력·고에너지 저장능력으로 인해 2차전지와 함께 전기 화학적 에너지 저장시스템으로 주목 받고 있다. 또한 슈퍼 캐패시터는 2차전지에 비해 에너지 효율이 높으며, 수명이 길고, 단자전압이 충전상태시 직선적으로 비례하므로 2차전지와는 달리 급속 충·방전 및 측정 가능하여 슈퍼 캐패시터 내 에너지 잔류량을 예측할 수 있다.

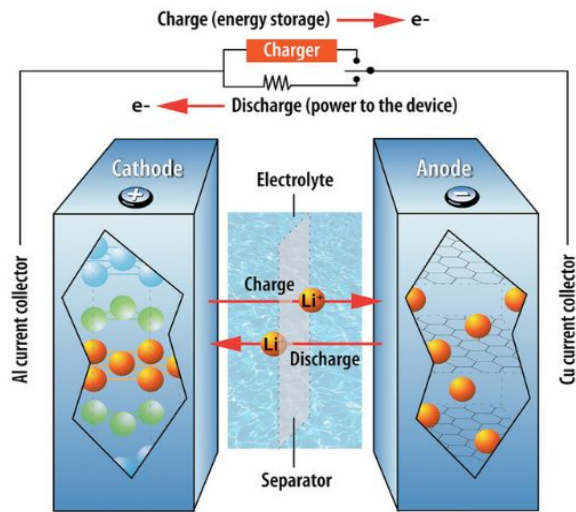


그림 13 슈퍼캐패시터의 동작원리

일반적으로 2차전지는 짧은 시간 내에 많은 에너지를 전달하는데 있어 부가적으로 많은 제약을 받는다. 이는 2차전지의 내부저항에 의하여 충·방전 전류가 제한되기 때문이며, 대전류의 충·방전은 2차전지의 수명을 단축시키는 요인이 된다. 반면 슈퍼 캐패시터는 전극과 전해질 사이에 형성되는 단위셀 전극의 양단에 전압이 가해지면 전해액 내의 이온들이 전기장을 따라 이동하여 전극표면에 달라붙은 후 발생하는 전기 화학적 매커니즘을 통해 작동되는 에너지 저장시스템이다. 표 3와 같이 슈퍼캐피터는 기존의 캐패시터와 2차전지의 중간적인 특성을 가지고 있으며, 급속 충·방전, 출력밀도, 사이클 수명이 반영구적인 특성은 2차전지보다 우수하지만 에너지 밀도는 2차전지보다 낮은 특성을 가지고 있다.

표 3 캐패시터 특성 비교

Parameter	Supercaps	Capacitors	Batteries
Energy Storage	W-sec of energy	W-sec of energy	W-Hr of energy
Charge Method	voltage across terminals I.e from a battery	voltage across terminals I.e from a battery	current & voltage
Power Delivered	rapid discharge, linear or exponential voltage decay	rapid discharge, linear or exponential voltage decay	constant voltage over long time period
Charge/Discharge Time	msec to sec	psec to msec	1 to 10 hrs
Form Factor	small	small~large	large
Weight	1~2g	1g~10kg	1g ~> 10kg
Energy Density	1~5Wh/kg	0.01Wh/kg	8~600Wh/kg
Power Density	High, > 4000W/kg	High, > 5000W/kg	Low, 100~3000W/kg
Operating Voltage	2.3V~2.75V/cell	6V~800V	1.2V~4.2V/cell
Lifetime	> 100k cycles	> 100k cycles	150~1500cycles
Operating Temp	-40℃ ~+85℃	-20℃ ~+100℃	-20℃ ~+65℃

Ⅲ. 실험 및 결과고찰

A. 광주도시철도 회생에너지량 측정 및 분석

광주광역시 마륵변전소 회생인버터를 통하여 회생되는 전력량을 실시간 측정하여 모니터링한다.

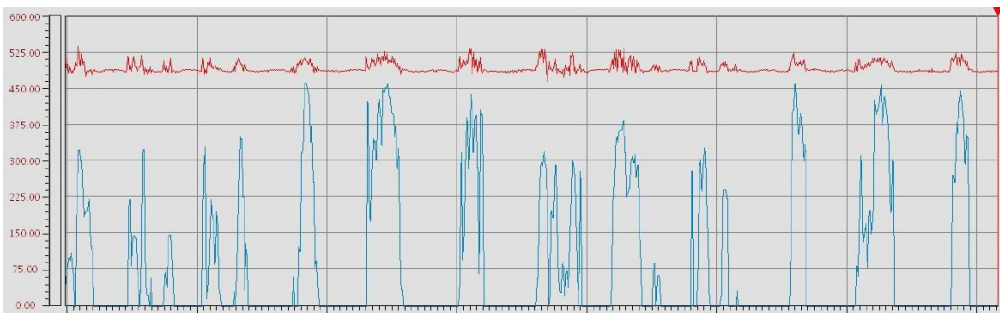


그림 14 교류 출력전압 및 직류 인입전압

설치된 회생인버터 시스템은 기동 및 정지 전압 조정이 가능한 시스템으로 구성되어 있어 직류 인입전압 1700[V] 이상에서 기동하여 1660[V] 이하에서 정지하도록 설정되어 있다. 그림 14는 전동차량에서 전력 회생 후 인접 차량에서 회생 전력을 흡수하지 않으면 전차선 전압이 상승하고 이로인해서 직류인입 기동전압 이상으로 상승하면 회생인버터는 작동 및 회생전력이 발생함을 보여주고 있다. 이와 같은 방법으로 순시전력을 누적하여 일일 발생하는 회생전력량 및 월간, 연간 회생전력량을 측정한다.

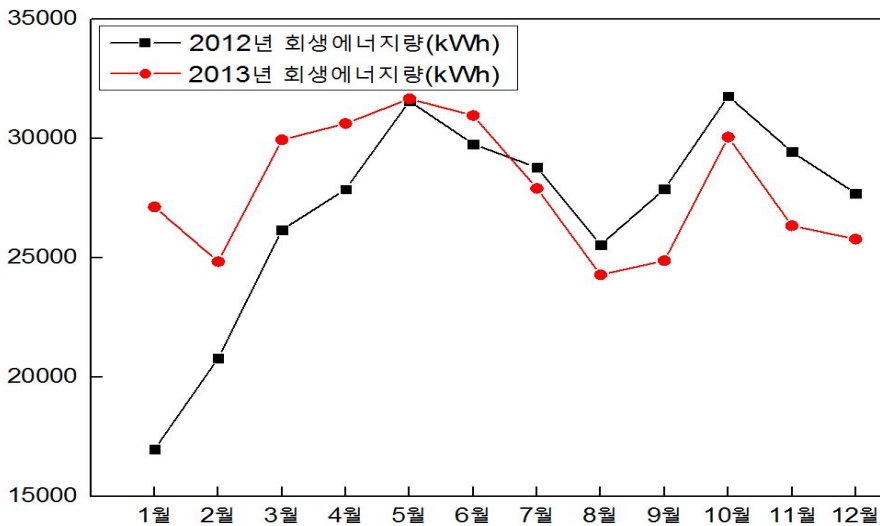


그림 15 월별 회생에너지 전력량(kWh)

그림 15에서는 연간 회생에너지 전력량을 비교하여 나타내었으며, 실제 운영한 2년간의 데이터는 비슷하였으며 월별로 측정했을 시 운행초기의 에러 및 조작 미숙, 셋팅값 수정으로 인해 운휴날이 많았던 2012년 1~2월을 제외하면 계절별로 인버터 회생량은 비슷한 패턴을 보이고 있다. 계절적인 요인으로 봄, 가을에는 인버터 회생량이 증가하였고 여름, 겨울에 회생량이 다소 감소함을 볼 수 있는데 이는 전동차의 보조전원에서 냉·난방 전력이 상시 가동되어 있을 때 회생에너지의 전동차간 수가 증가하고 회생인버터 전력량이 줄어드는 것으로 판단된다.

B. 전동차량 종합제어장치를 통한 전력량 측정

전동차량은 도시철도 설비에 있어서 최종 부하설비이며, 회생시는 발전설비가 되며, 전동차량에서의 역행사용량과 회생발생량의 측정이 정밀하고 정확하다. 열차 종합제어시스템의 상·하행선별 전력량을 분석하였고, 이 열차 종합제어시스템에서의 전력량은 실시간 승무원 좌석에서 모니터링 할 수 있으며 전동차 내 인버터에서 kWh당 펄스로 전달하므로 정밀한 값은 측정하기 어려움으로 상·하행선별 각각 출발역에서 도착역까지의 전구간의 전력량을 측정 및 분석하였다. 광주광역시 도시철도 출발역(소태)에서 도착역(평동)까지 운행시 승무원 운전석 열차 종합제어시스템 장치를 통하여 측정은 상·하행선별 각각 15회씩 하였다. 전동차에서의 측정은 출퇴근 시간 및 주말, 공휴일 상관없이 비슷한 측정값을 보였다. 15회 평균값은 다음과 같다.

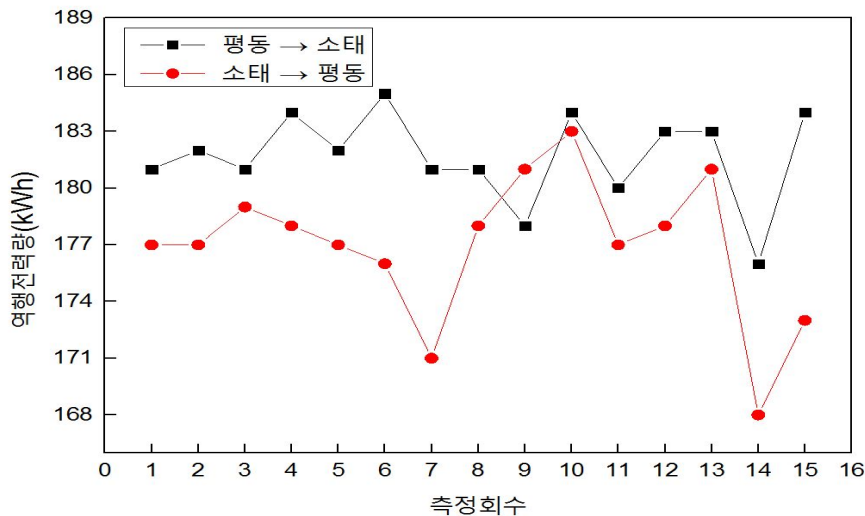


그림 16 전동차 열차종합제어시스템에 의한 역행 전력량(kWh) 측정

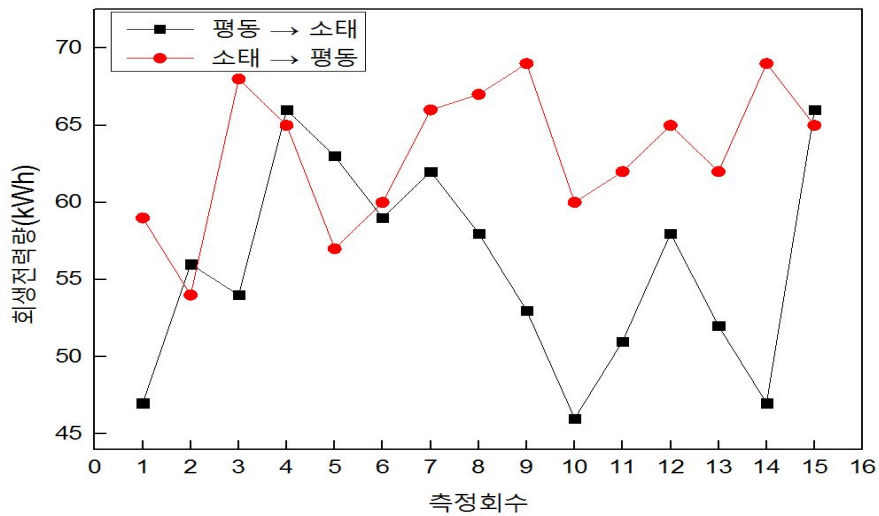


그림 17 전동차 열차종합제어시스템에 의한 회생 전력량(kWh) 측정

평동에서 소태까지 운행시 역행 전력량은 181.2kWh이며, 회생 전력량은 55.6kWh 이다. 소태에서 평동까지 운행시 전동차 역행 전력량 은 175.9kWh 이며, 회생 전력량은 62.9kWh이다.

C. 연간 소비 전력량(kWh) 및 회생전력량(kWh) 분석

마륵변전소 회생인버터의 가동시와 미가동시 수배전반(22.9kV반) 전류사용량을 전력 분석기를 사용하여 측정하였다. 회생인버터 미가동시에는 직류전동차량 부하와 상관없이 일정한 역사 부하를 담당하므로 일정 전류값 이하로 줄어들지 않으며, 가동시에는 회생순간에 인버터에서 전원을 공급하여 수배전반 전류 사용량이 15A이하로 줄어듬을 알 수 있었다.

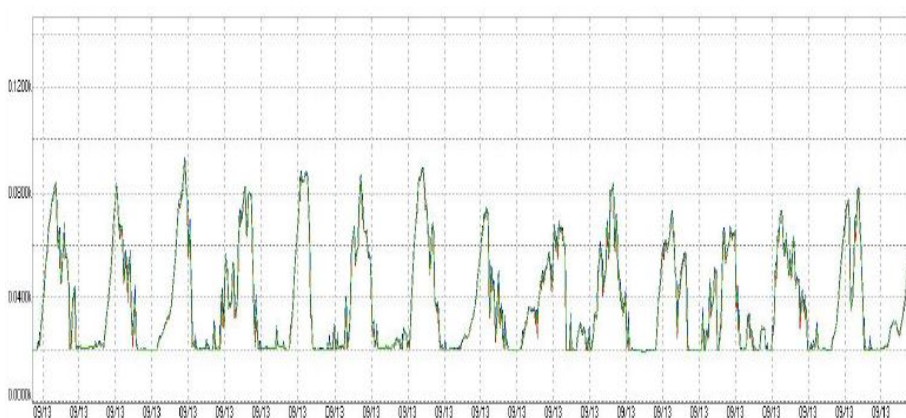


그림 18 광주광역시 마륵변전소 수배전반
전류 사용 현황(회생인버터 미가동시)

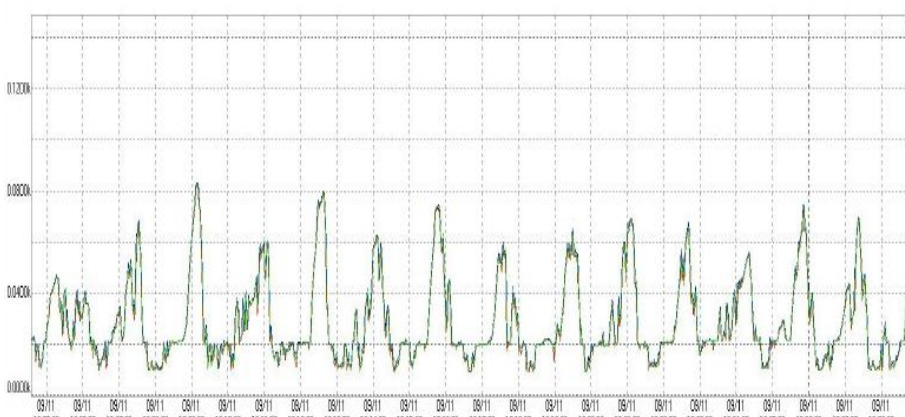


그림 19 광주광역시 마륵변전소 수배전반
전류 사용 현황(회생인버터 가동시)

광주광역시 도시철도에 회생인버터가 2012년부터 설치되어 사용되었으며 운영 전·후 전력사용량 비교를 위하여 2011년부터 2013년까지의 전력사용량을 분석하였다. 직류 전동차량과 구간별 역사 전력사용량 총합인 한전 전기요금상의 사용량을 도시철도내의 각 변전소 별로 분석하였으며, 도시철도의 에너지 절감에 의해 전반적으로 변전소에서 아주 미세한 증가를 하였으며, 회생인버터를 활용하여 다른 변전소에 비해 마륵변전소는 에너지 절감 효과가 크게 나타났다.

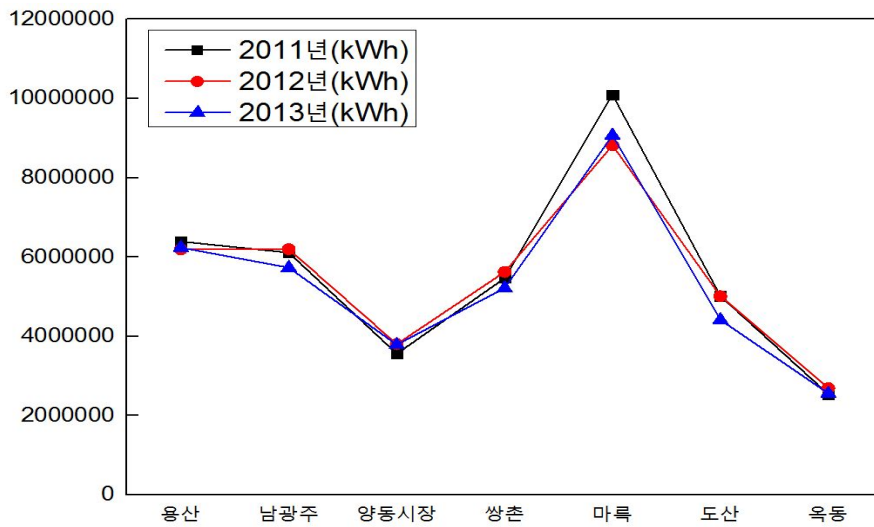


그림 20 광주광역시 도시철도 변전소별 연간 전력사용현황

IV. 결론

본 논문에서는 도시철도의 직류 급전 시스템에서 발생하는 회생에너지를 제어 하기 위하여 여러 방법들을 비교 분석하였고 국내 최초로 운영 중인 광주광역시 도시철도 회생인버터의 회생률을 분석하였고 회생에너지 저장시스템에 특성 및 적용에 대해 다음과 같이 연구 및 해석을 수행하였다.

회생인버터는 연간 회생전력량의 총사용량을 계측 및 시간별로 회생전력 분석을 통하여 출퇴근시간에 전동차량간 회생전력이 증가하며, 월별 분석에 의해서 전동차 냉·난방기 사용이 많은 계절적 요인으로 여름철 및 겨울철에 전동차량간 회생전력이 증가하여 회생인버터에 의한 고압 수배전반으로의 교류 전력 공급량이 감소함을 확인 할 수 있었다.

전동차량내 열차종합제어장치에서의 역행·회생전력량 측정을 통하여 광주광역시 도시철도에서의 상·하행선 회생률(역행/회행)은 각각 35.6% 30.5% 임을 분석하여 하행에서의 회생률이 높음을 확인하였다. 회생인버터가 설치된 마륵변전소 급전 구간에서의 상·하행선 회생률은 각각 27.2% 41.7%로 확인되었다. 이는 철도기술연구원에서 진행한 시뮬레이션 결과에 대한 회생인버터의 회생량 20%에는 근접하지 못하지만 광주광역시 도시철도 전구간의 선로에서의 회생률이 33.2% 임을 감안하면 비슷한 수준이다.

결과적으로 전체선로 구간 약 21km, 변전소 8개의 시설에 회생인버터 1기를 설치하여 전체 전동차량의 회생 잉여전력은 선로손실 등이 증가하여 회생인버터에서 사용하지는 못하지만 마륵변전소 근처에서 설치된 회생인버터의 회생 잉여전력은 유효하게 사용됨을 확인하였으며 회생용 인버터의 설치에 에너지 절감 및 전압의 안정도 향상에 유용한 설비임을 확인 할 수 있었다.

Reference

- [1] SIEMENS AG. SITRAS SES, “Energy Storage System for Mass Transit System”, 2005.
- [2] 국토해양부, 한국건설교통기술평가원, “도시철도차량 탑재용 회생에너지 저장 및 활용 기술개발 기획”, 2012.
- [3] 한국철도기술연구원, “에너지 저장 기술 시스템 역사 적용을 위한 적용성 연구”, 2006.
- [4] 최병운, “직류 전기철도 에너지 절감방안 연구 - 전력회생인버터 시스템 적용을 중심으로”, 서울산업대학교 석사학위논문, 2006.
- [5] 김홍구, “지하철 공랭식 정류기 오바홀 도입으로 발생하는 고장빈도 변화에 관한 연구”, 한양대학교 석사학위논문, 2013.
- [6] 장수진, “가선전압 모의 장치를 사용한 회생전력 제어용 에너지 저장 시스템”, 성균관대학교 석사학위논문, 2007.
- [7] Rufer. A and Lemofouet. S, “Efficiency considerations and Measurements of a Hybrid Energy Storage System based on compressed Air and Super Capacitors”. IEEE IAS Conf. Rec. pp 2077-2081, 2006.
- [8] H. Wu and Dougal. R, “Comparison of Fuel Cell Hybrid Propulsion Topologies with Super-Capacitor”, IEEE IAS Conf, Rec. pp 156-532. 2005.
- [9] 박찬홍, “철도차량 시뮬레이터를 이용한 능동 회생 양방향 DC-DC 컨버터 설계”, 성균관대학교 석사학위 논문, 2007.
- [10] 정동훈, “전동차 회생전력의 효율적인 이용을 위한 에너지저장장치 도입에 관한 연구”, 인천대학교 석사학위논문, 2010.
- [11] 장수진, 김용기, 방효진, 송상훈, 안규복, 원충연, “고조파 저감능력을 가진 직류 전철 회생인버터 시스템”, 조명전기설비학회 논문지, 제18권, 제5호, 2004.

- [12] 이형철, “하이브리드 자동차 개론 및 하이브리드 시스템 제어”, 산업
기술기반조성사업 하이브리드자동차 핵심기술인력 양성교육 교재,
HVEC, 2007.
- [13] Aaron Brooker, Kristina Haraldsson, Terry Hendricks, Valerie
Johnson, Kenneth Kelly, Bill Kramer, Tony Markel, Michael
O’Keefe, Sam Sprik, Keith Wipke, Matthew Zolot, “ADVISOR
Documentation”, NREL, 2002.
- [14] Zempachi Ougumi, Takeshi Abe, Minoru Inaba and Yoshiharu
Uchimoto, “Lithium Niji Denchi”, 2008.
- [15] R. M. Schupbach, J. C. Balda, “Comparing DC-DC Converters for
Power Management in Hybrid Electric Vehicles”, Electric Machines
and Drives conference, 2003. IEMDC’ 03. IEEE International Vol.3.
pp.1369-1374, 2003.
- [16] Yu Du; Xiaohu Zhou, Sanzhong Bai, Lukie, S, Huang, A, “Review
of Non-isolated Bi-directional DC-DC Converters for Plug-in
Hybrid Electric Vehicle Charge Station Applications at Municipal
Parking Decks” Applied Power Electronics Conference and
Exposition and Exposition (APEC), 2010 Twenty-Fifth Annual
IEEE, pp.1145-1151, 2010.
- [17] 이지명, 이재용, 박래관, 장서진, 최경수, “하이브리드 전기자동차 구
동용 전력변환장치”, 전력전자학회 논문지, Vol.13, No.6, 2008.
- [18] 정태복, “ESS기능을 갖는 직류배전용 전력변환시스템 통합운전, 성
균관대학교 석사학위논문, 2012.
- [19] Stefan Waffler, Johann W. Kolar, “A Novel Low-Loss Modulation
Strategy for High-Power Bidirectional Buck+Boost Converters,”
IEEE Trans. Power Electron, vol.24, no.6, pp.1589~1599, 2009.
- [20] Ned Mohan, Tore M. Undeland, “Power electronics: converters,
applications, and design”, 2007.
- [21] Yasunao Sekijima, Masayuki Inui, Yukitaka Monden, Hiroyuki

- Nishikawa, 『Application Study of Electric Double Layer Capacitor on regenerative braking for DC railway system』, IEE Japan, pp.195-196, 2004.
- [22] Takeshi Konishi, Shin-ichi Hase, Yoshinibu Nakamichi, Hidetaka Nara, Tadashi Uemura, Michihiro Sekizawa, Tetsuzo Yamamoto, 『Application of Electric Double Layer Capacitors for Railway Power Supply System』, Meidensha TER-04-48, pp.1-6, 2004.
- [23] Alfred Rufer, 『Energy Storage for Railway Systems, Energy Recovery and Vehicle Autonomy in Europe』, IEEE The 2010 International Power Electronics Conference, pp.3124-3127, 2010.
- [24] A. Okui, S. Hase, H. Shigeeda, T. Konishi, T. Yoshi, 『Application of Energy Storage System for Railway Transportation in Japan』, IEEE The 2010 International Power Electronics Conference, pp.3117-3123, 2010.
- [25] 백승길, 임지영, 차준일, 김길동, 권경민, 『에너지저장시스템의 충,방전 Auto Level-Tuning 알고리즘에 관한 연구』, 춘계학술대회 논문집, pp.1-7, 2010.
- [26] 철도차량용 Energy Storage System에 관한 연구, 강원대학교 표세완, 2011.

감사의 글

대학원 석사과정을 직장을 다니며 시작하게 되어 많은 걱정을 했으나, 어느덧 2년이라는 시간이 빠르게 지나고 마무리하는 시기가 되어 감회가 새롭고, 좀 더 열정적으로 연구하는 자세로 즐겁게 지냈으면 하는 아쉬움이 많이 남습니다. 이렇듯 석사과정을 마무리 할 수 있었던 것은 많은 가르침과 도움을 주신 분들이 있어 가능했다고 생각하며 감사의 말씀을 드립니다.

먼저, 생각하지 못했던 대학원 학업을 시작 하도록 이끌어주시고 조언과 격려를 아끼지 않았던 박채옥 교수님께 깊은 감사를 드리고, 논문 완성에 될수 있도록 세심한 지도와 열정적인 강의를 해주신 지도교수님이신 김남훈 교수님과 아낌없는 가르침으로 많은 도움을 주신 조금배 교수님, 이우선 교수님, 최효상 교수님, 서길모 교수님, 김철준 교수님과 정현숙 선생님께 진심으로 감사의 말씀을 올립니다.

그리고 옆에서 묵묵히 지켜봐주고 응원해준 아내 임현정, 딸 서연, 아들 민준, 민재 그리고 부모님 외 모든 가족에게도 이글을 통해서 감사를 드립니다.

마지막으로 조선대학교 전기기술융합공학과를 통해 만나게 된 인연을 소중히 간직하겠습니다. 감사합니다.