

# DC전철구간에서의 에너지 절약시스템에 대한 고찰

## Review of energy saving system for DC Electric Railway

김용기\*, 윤희택\*\*, 목재균\*\*, 장세기\*

Yong-Ki Kim, Hee-Taek Yoon, Jai-Kyun Mok, SeKy Chang

---

### Abstract

Electrification of existing railroad as well as extension of double track, need a large amount of electric energy. Especially, increase in energy consumption of high cost causes much problems in domestic economy. It is necessary to save energy for the crisis of exhaust of fossil energy. About 20~25% of regenerated energy of an electric railcar is lost on down slope run or on braking. In order to save energy in electric railway system, Therefore, application of energy regeneration system is proposed and introduced in the present paper.

---

### 1. 서론

국내의 전철화 사업은 범국가적인 차원에서 진행되어 2004년에는 41.9%, 2012년에는 65.9%정도 전철화 예정이다. 한편, 세계 철도는 리오선언과 교토협약에 의해 UIC를 중심으로 에너지 절약에 대한 대대적인 연구가 진행중에 있으며, 특히 장기적인 목표를 설정하여 에너지 절약에 대한 프로그램의 도입이 진행되고 있다. 이러한 상황을 고려해 볼 때 향후 에너지 절약은 국가 경제에 중요한 요소로 작용하고 있고, 에너지원 고갈은 국내외적으로 심각한 문제를 야기할 것으로 예측된다. 따라서 전철화의 발전 추세에서 전기철도에서 사용되는 에너지의 효율화 및 대량의 전기에너지를 사용하게 될 전철시스템에서의 에너지 절약대책과 에너지 재사용을 위한 운용 효율화 방안 마련이 시급한 실정이다.

전동차가 운행중인 구간이 하구배 구간(경사 구간)이나 감속 운행시에는 전동차에서 발전 제동이 되어 많은 양의 전력이 발생하게 된다. 이 에너지는 전동차를 가속하기 위해 투입된 에너지의 45~47%정도이며 약 20%정도는 전동차에서 소모되나 나머지 20~27%의 에너지가 잉여 전력으로 남고, 이 전력은 직류 가선 전압을 상승시킨다. 직류 가선 전압이 일정 전압 이상으로 상승할 경우 변전소의 정류기 및 차량에 탑재된 전력 변환기에 고장을 가져 올 수 있기 때문에 전력을 강제로 소모시키는 장치가 필요하다. 이 장치는 현재 변

---

\* 한국철도기술연구원 책임연구원, 정회원

\*\* 한국철도기술연구원 선임연구원, 정회원

전소와 차량에 모두 갖추고 있으며 이용, 가선전압의 상승을 교류 모션으로 회생시킬 경우 직류 가선 전압의 상승을 억제할 수 있을 뿐만 아니라 회생시키는 에너지만큼 절약을 기대할 수 있을 것으로 판단되며, 본 연구에서는 DC전철구간에서의 에너지 절약기술과 잉여에너지 활용을 위해 제안하고자 하는 에너지절약 시스템을 소개하고자 한다.

## 2. 철도와 에너지 절약

### 2.1 차량에너지 절약기술

에너지절약을 실현하기 위한 기술로는 다음과 같이 분류할 수 있다<sup>1)</sup>.

- ① 차체 경량화
- ② 모터 제어의 고효율화
- ③ 회생제동
- ④ 운전의 효율화

차체의 경량화에 관해서는 종래의 철과 스텐레스가 도입되어 왔지만, 차량에서의 강도, 강성, 방음·차음성을 실현한 후에 저비용화·경량화를 도모할 수 있는 알루미늄 차체 재료가 보급되고 있다. 현재 주종이 되고 있는 VVVF 인버터 전동차의 높은 에너지 절약성이 확인되고 있다. 전기철도차량에서 회생제동의 도입으로 에너지 절약도 가능하다. 즉, 역행차와 회생차가 동시에 주행하는 운전방법을 사용하면 회생차로부터의 회생전력에 의해서 역행차의 전력을 일부 부담하는 것이 가능하며, 변전소로부터 공급되는 전력량을 절감시키는 것도 가능해진다

### 2.2 차량회생전력의 유효이용

차량기술의 고도화에 의해서 에너지절약화가 진행되고 있는데, 지상설비에 관해서도 에너지 절약 기술이 진전되고 있다. 직류전기철도의 변전소에서는 3상 고전압을 정류기에 의해서 직류로 변환하여 가선에 흘려 보내고, 차량에 전원을 공급하고 있는데 그 정류기를 반도체 전력 변환 소자를 이용한 정류기에서 변전소로부터의 직류 전압을 제어하고 전동차에 최적의 전압을 송출하는 제어를 하거나 변전소에 인버터를 설치하여 차량으로부터의 회생전력 중 역행차에 공급되지 않았던 에너지를 흡수해서 역사의 부대설비(역 구내의 조명 설비 등)에 사용하여 유효 에너지 절약을 실시하는 방안도 있다.

## 3. 회수장치를 이용한 에너지절약

최근 직류전철화구간에서 전력 회생 차량이 많이 도입되었다. 회생 차량은 정지 또는 경사구간에서의 감속시 제동으로 회생 에너지를 발생시킨다. 이 회생 에너지는 근처에 역행 차량이 있으면 에너지는 역행차량으로 흘러 유효하게 이용된다. 근처에 역행차가 없으면 회생 에너지가 흐를 곳이 없기 때문에 에너지를 유효하게 이용할 수 없을 뿐만 아니라, 제동력을 기계적인 마찰 브레이크에 의존하게 되기 때문에, 브레이크 슈의 마모율이 증가하게 된다.

### 3.1 회생에너지

전동차는 정지하기 위해서 제동장치를 이용하는데 제동의 종류는 기계제동과 전기제동으로 크게 나눌 수 있다.

#### 가. 기계제동

전동차의 디스크 브레이크(disc brake)와 같은 것으로 마찰력에 의해서 제동하지만 열과 마모를 동반한다.

#### 나. 전기제동

전동차의 엔진 브레이크와 같은 것으로 전동차도 엔진 회전에 의해서 배터리를 충전하듯이 전차의 모터를 발전기로서 운전하여 운동 에너지를 전기 에너지로 변환하여 전차선으로 되돌린다. 이 에너지를 회생전력이라고 부른다.

### 3.2 회생 전력 회수장치의 의의

회생 전동차의 보급에 따라서 일반적으로 회생차에 의해서 발생한 전력은 직류가선으로 회귀되고, 역행차가 있는 경우에는 회수되지만, 회생 전력이 역행 전력을 상승하는 경우가 있다. 회생 전력의 회수장치는 잉여전력의 양적 평가와 차량회생 실효(차량에서 전기를 보낼수 가 없어서 전기 브레이크가 효과가 없는 상태)를 방지하는 것에 의한 각종 파급효과에 의해서 평가되고 있다<sup>2)</sup>. 즉, 회생 전력 흡수장치를 설치할 경우 다음과 같은 효과가 있다.

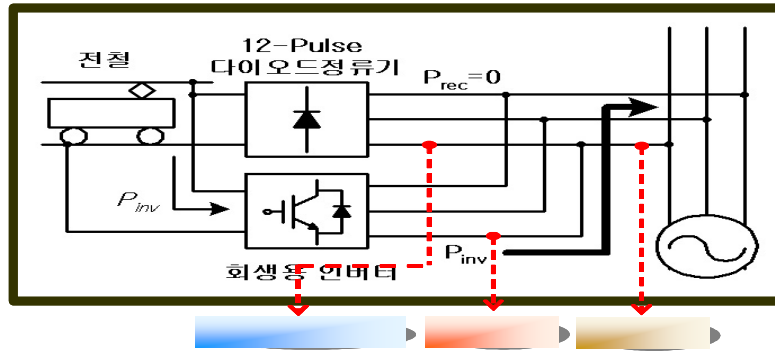
- 회생 전력 유효이용에 의한 에너지 절약 효과
- 경사구간에서의 속도감속 때 제동 안전 작동에 의한 안전성의 향상.
- 열차 자동 운전시 정지 위치에서 벗어나는 것을 방지
- 공기 브레이크 사용 경감에 의한 브레이크 슈 마모의 절감
- 지하 터널 내 온도 상승의 억제
- 브레이크의 열과 이상한 냄새에 의한 불쾌감 해소

### 3.3 회생에너지 회수방법

회생 전력을 흡수하는 방법은 회생 전력을 발생시키는 차량에서 대응하는 방법으로서, 차량에 저항기를 설치하여 열로 흡수하는 방법(차량에 큰 저항을 탑재하는 것은 차량 중량 및 스페이스로 할 수 없기 때문에 회생 전력을 모두 흡수하는 것은 곤란)과 지상에서 흡수하는 방법으로서, 회생용 인버터, 저항기 및 플라이 휠(fly wheel) 등을 설비하는 방법을 생각할 수 있다.

#### 가. 인버터(inverter) 방식

직류의 회생 에너지를 인버터(직류→교류)에 의해서 교류로 변환하고, 전력계통으로 되돌려서 에너지를 소비한다. 전동차에서 회생전력을 변전소로 다시 회귀시키는데 그때의 전압·전류를 검지하여 정격전압이상이 되면 게이트(IGBT, SCR, GTO 등)를 제어하여 직류를 교류로 변환한다. 회생전류와 전압이 정격이상이 되면 회생영역이 되어 회생전력을 흡수하기 시작한다. 그러나 회생전류가 너무 크면 인버터로 사용하고 있는 전류에 한도가 있기 때문에 회생전류를 줄여서 회생장치를 정지시킨다. 이 때의 전압은 전동차 본체의 허용전압과 협조한다. 일본, 스위스에서는 인버터 방식을 전철시스템에 적용되고 있는 실정이다.



<그림 1> 회생인버터 운전모드

나. 초버(chopper) 저항방식

차량에 저항기를 탑재하는 것을 지상 변전소에서 회생 에너지를 저항에 의해서 열 에너지로 변환하여 소비한다.

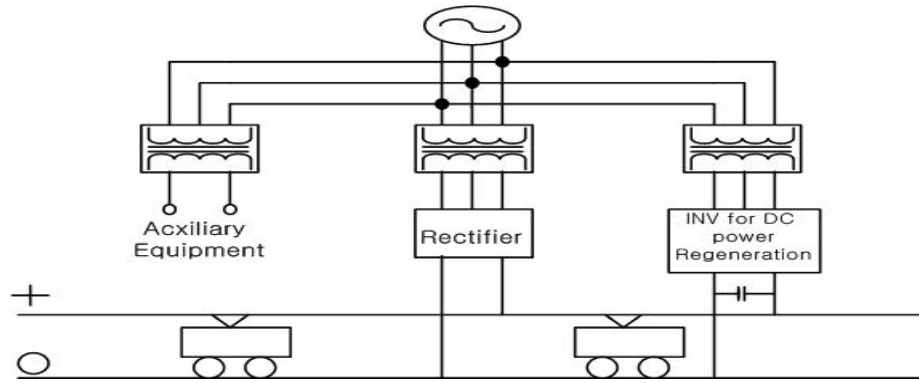
다. 플라이 휠방식

플라이 휠과 교류 발전 발동기로 회생 에너지를 흡수·방출한다.

### 3.4 회생에너지 시스템도입 방안

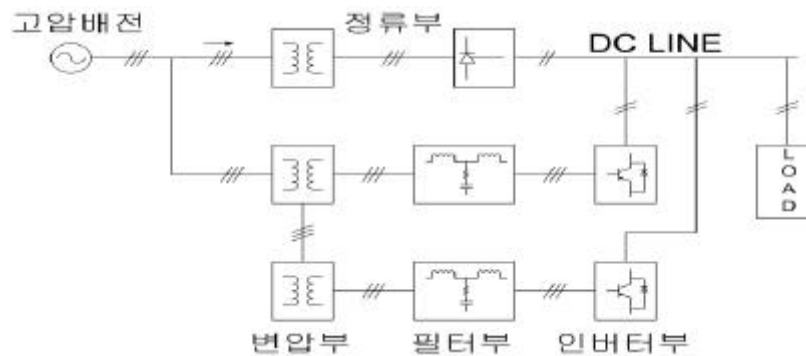
<그림 2>는 직류모선의 잉여 분 직류전력을 교류모선으로 회생시키는 전철 시스템의 개념도이다. 정상 운전 시에는 교류전원에서 공급된 전력이 다이오드 정류기를 통해 정류된 다음에 전동차에 전력이 공급된다. 전동차에 사용되는 전동기는 직류 전동기 또는 유도 전동기이며, 어느 경우이든지 직류모선으로부터 전력을 공급받는다. 전동차나 제동중이거나 하강 경사로 주행 시에 직류모선으로 회생된 에너지는 같은 직류구간 내에서의 다른 전동차에서 소모된다. 그러나 동일 구간의 직류 모선 내에 주행 중인 전동차가 없거나 회생된 에너지가 인접된 전동차에서 필요한 전력보다 많으면 직류모선의 전압은 점점 상승하게 된다. 이 전압이 일정 전압을 초과하게 되면 제동저항이 동작하여 과전압으로부터 시스템을 보호하게 되며, 그 결과 전기에너지가 소비된다. 이러한 문제를 해결하기 위해 인버터를 사용하여 직류모선의 잉여전력을 교류모선으로 회생할 필요가 있다<sup>3)</sup>.

도시철도공사의 경우 전철시스템에 전력을 공급하는 교류모선은 교류 22,900[V]의 수전선로이며 다이오드 정류기를 거친 후의 무부하 직류전압은 1,593[V]이다. 전동차에 전력을 공급하는 직류모선 한 구간의 길이는 대략 2~3 [Km]이며 한 변전소가 두 구간의 직류모선을 담당하고 있다. 변전소에는 3대의 다이오드 정류기가 설치되어 있는데 2대는 각각 한 구간의 직류모선을 담당하며 나머지 1대의 정류기는 예비용이다. 정류기 및 회생용 인버터를 겸용하는 시스템에 의해 에너지를 회생시킬 수 있으나 다음과 같은 이유로 회생용 인버터를 별도로 설치하는 것이 유리하다<sup>4,5)</sup>.



<그림 2> 회생용 인버터를 사용한 전철 시스템

전동차 시스템에는 전력변환 장치의 사용으로 고조파 전류발생, 역률 저하, 전압의 외형이나 불평형이 수반되므로 역기능으로 전력기기의 상호교란, 온도상승 등의 문제가 발생되므로 능동필터의 기능을 가진 직류전력 회생용 인버터를 개발을 위한 알고리즘 개발과 실제 시스템을 모사한 실험 장치를 통하여 타당성 검증이 이루어지고 있다. <그림 3>은 제안된 직류구간 전철 시스템의 구성도이다. 다이오드 정류모드로 동작 시에는 능동전력필터 기능을 갖고, 직류 전압이 상승 시에는 회생인버터로 동작하는 시스템도를 나타낸다. 시스템에 적용될 전력변환장치에 IGBT 인버터를 사용하고 직류 전력회생, 무효전력 보상, 전류 고조파 억제, 전압 고조파 억제, 전류제어 기능을 갖는다.



<그림 3> 제안된 직류구간 전철 시스템의 블록도

### 3.4 회생전력량 조사

#### 3.4.1 운행차량 전력데이터

<표 1>은 운행 차량데이터의 누적된 전력량에 의한 회생율을 나타낸 것이다. 대체적으로 평일의 전력회생율이 주말 보다 높게 나타남을 알 수 있으며 7호선의 경우가 가장 큰 회생율을 보이고 있다.

<표 1> 운행 차량 데이터에 의한 전력

구 분 노 선		소비전력량(kw)	회생전력량(kw)	회생율(%)	비고
5호선	주말	21880	4930	22.53	1~2일 전력량
	평일	65810	11120	16.90	
6호선	주말	1120	435	38.84	약 4시간 (오후)
	평일	1235	483	39.11	
7호선	주말	7669	2936	38.28	약12시간
	평일	7634	3058	40.06	
8호선	주말	205	75	36.59	구간주행 (오전)
	평일	202	79	39.11	

#### 4. 결론

최근 환경문제로 대두되고 있는 시점에서 철도는 친환경적이고 에너지 절약이 뛰어나서 친환경 교통시스템이라고 말할 수 있다. 현재 철도는 신선로 및 전철의 복선화로 막대한 에너지 소비를 필요로 할 뿐만 아니라 에너지원은 대부분 화석연료로 얻어지는 전기에너지원으로서 에너지원고 같이 대비한 에너지 절약방안을 고려하여야 한다. 환경친화적인 철도를 조성하기 위해서는 환경부하를 저감할 수 있는 방안을 모색하여야 한다. 전철시스템에서의 에너지 절약을 통한 경영개선과 서비스 향상을 도모하여 공기제동에 의한 정지를 위해 터널내에서 브레이크 슈에 의한 열과 냄새 및 철분의 오염 등의 영향을 방지할 수 있을 것이다. 또한 변전소에 회생시스템을 설치하면 차량의 부대설비 설치비용의 저감과 차량의 경량화 감소를 유도할 수 있다. 직류전철구간에서의 에너지 회생률 측정·분석결과 30~40% 정도를 나타내고 있어 낭비되는 에너지절약을 위해서는 낭비되는 에너지를 회수할 수 있는 에너지 회생시스템의 도입이 필요하다.

#### 감사의 글

본 연구는 국가교통핵심기술개발사업에서 지원된 차세대 전철시스템 에너지 회생장치 개발 과제 로 수행된 것이며, 지원에 감사드립니다.

#### 참고문헌

1. 環境重視の時代における鐵道技術, 運輸と經濟, 第63卷 第12号, 2003.12
2. 김준순 외 3인, 육상교통 수단의 환경성 비교분석, 한국환경정책·평가연구원, 2002. 12
3. 秋田武米變, 電所における回生電力吸收裝置, 鐵道と電氣技術, 1998
4. 김경원 외 3인, 직류전력회생시스템의 역률개선에 관한 연구, 전력전자학회지 논문지, 제6권, 제5호, 2001
5. A.Horn, R.H.Wilkinson, and T.H.R.Enslin, Evaluation of converter topologies for improved power quality in DC traction substations, ISIE of IEEE, Vol.2, pp.802~807, 1996.