

직류 전기철도 에너지 절감방안 연구

A Study on the Energy Saving Strategy in Electric Railway System

최병운* 창상훈** 김학련***
Choi, Byung-Woon Chang, Sang-Hoon Kim, Hak-Ryun

Abstract

The regenerative braked cars are being introduced in DC electric railway for energy saving. There has been a recent tendency for DC traction substation with regenerative inverter to increase in number. This is strongly related to the desire for effective utilization of electric power regenerated by DC electric cars and to the aim ensuring stable operation of regenerative braking system. The regenerative inverters DC power feed back from a generative car into AC power at a substation and supplies it to distribution lines. This paper suggest the result of characteristic analysis and capacity simulation, economical analysis in the regenerative inverter system.

1. 서 론

대도시 지하철의 지속적인 확장과 주요 간선의 전철화 등으로 철도의 주 동력원으로서 전기에너지 수요가 크게 증가하고 있다. 특히 도심 교통난 해결을 위한 도시철도 확충 수요는 앞으로도 지속될 전망이다.

도시철도와 같은 전기에너지를 이용한 전기철도 운용의 증가는 에너지 이용 효율증대를 위한 여러 가지 원가 절감 방안을 강구하게 되었으며, 본 논문에서는 전기에너지 절감방안의 일환으로 전력사용이 가장 많은 전동차의 회생전력에 대해 연구 검토하였다.

직류 전원으로 운행되는 지하철 전동차의 경우 역에 정차하기 위해 제동을 하거나 하강경사로 주행시 발생하는 회생전력을 인근 변전소 급전시스템으로 흡수하여 회생 인버터 장치에 의해 교류로 전환하여 지하철 역사의 부대용 전력으로 재사용 하므로써 전력요금 절감 등 효율적인 에너지 이용 방안에 대해 서울 지하철 전력설비에 적용시를 중심으로 검토하였다.

국내의 지하철에는 현재 회생인버터 시스템이 설치되어 있지 않아 전동차에서 발생하는 회생전력은 대부분 인접차량에서 흡수하지만 나머지는 손실되는 실정으로 이에 대한 시스템 구축의 필요성이 강조되고 있으며, 이러한 회생제동 시스템은 장거리 구배구간이 길고, 가선전압 상승이 높은곳이 많은 지하철이 매우 효과적이다. 현재 지하철 1~4호선의 경우 연간 전력사용량이 약 8억7천만 [kwh] 이며, 전력요금은 연간 약 650억원으로 이중 전동차에서 소모되는 전력량이 72%에 이른다.

회생 전력시스템의 설치효과는 전동차에서 소모되는 전력량을 최소화하고 부가적으로 급브레이크 적어져 승차감을 향상 시켜줌으로서 이용시민에 서비스를 제공함은 물론, 정위치 정차에 의한 지하철

* 서울산업대학교, 철도전문대학원 철도전기,신호공학과 석사과정

** 한국철도기술연구원 책임연구원, 공학박사, 정회원

*** 서울산업대학교 전기공학과 교수, 공학박사.

에서 현재 추진중인 스크린 도어와의 상호 연계동작에 이바지 할 것이며, 전기 브레이크 성능 향상으로 전동차 브레이크 패드 교환주기가 길어져 차량 유지보수비를 저감시키는 부대 효과를 가져 올 것으로 예상된다.

따라서 본 논문은 직류전기철도 급전시스템을 살펴보고 회생용 인버터시스템의 특성분석과 시뮬레이션 결과에 따라 인버터시스템의 적용여부를 검토하여 그 결과를 제시하였다.

2. 전기철도 전력용 인버터 시스템 기술특성 분석

2.1 시스템의 개요

직류 전기철도 급전시스템은 정상 운전시에는 교류전원에서 공급된 전력이 다이오드 정류기를 통해 직류 전력으로 정류하여 전동차에 전력이 공급된다. 전동차에 사용되는 전동기는 직류전동기 또는 유도전동기이며, 어느경우이든 직류모션으로 부터 전력을 공급 받는다. 전동차가 제동중이거나 하강 경사로 주행시에 직류모션으로 전력이 회생되면 직류모션의 전압이 상승한다.

이때 직류 모션으로 회생된 에너지는 같은 직류구간 내의 다른 전동차에서 소모된다. 그러나 동일구간의 직류모션내의 주행중인 전동차가 없거나 회생된 에너지가 인접한 전동차에서 필요한 전력보다 많으면 직류모션의 전압은 점점 더 상승하게 되며 가선전압이 1,800V이상 상승하면 저항을 통해 열에너지로서 전력을 소모하여 과전압으로 부터 시스템을 보호하게 되며, 그 결과 전기에너지를 허비한다.

이렇게 불필요하게 열에너지로 소모되는 회생전력을 다시 교류전원으로 보내어 활용하기 위해선 인버터를 사용하여 직류가선의 잉여전력을 교류 전력으로 바뀌어 교류전원으로 회생시킬 필요가 있다.

이러한 용도의 인버터가 회생용 인버터이며, 인버터에 의해 회생된 에너지는 보조설비나 다른 구간의 전동차에 공급되어 활용된다.

이 대용량 회생인버터를 변전설비에 설치하여 에너지의 재활용에 의한 에너지절감에 기여하고 전동차 운행시 환경향상을 도모한다. 그림2.1은 회생전류의 흐름도 개념을 나타낸 것이다.

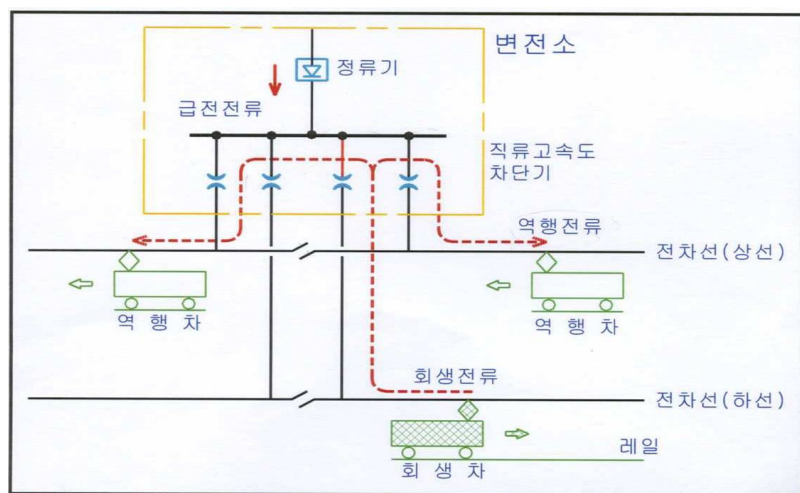


그림2.1 회생전류 흐름도

2.2 종류 및 특성 분석

표2.1은 전기철도에 적용되고 있는 각종 회생인버터의 종류 및 특징을 분석하여 나타낸 것이다.

표2.1 회생인버터의 종류 및 특징

| 종 류 | 사이리스터인버터 | 사이리스터초퍼저항 | 플라이휠 포스트 |
|-----|--|---|---|
| 원 리 | 직류의 회생 에너지를 사이리스터 인버터에 의해 교류로 변환하여, 전력계통으로 되돌림으로서 에너지를 소비한다. | 회생에너지를 저항에 의해 열에너지로 변환하여 소비한다. | 플라이휠과 교류발전전동기에 의해 회생에너지를 흡수, 방출한다. |
| 특 징 | <ul style="list-style-type: none"> · 구배선로나 고배부가 많은 개소에 유리. · 회생에너지를 유효하게 이용 가능 · 차량의 회생실효가 작아짐. | <ul style="list-style-type: none"> · 변환이 용이 · 회생에너지가 작을 때 경제적임. · 차량의 회생실효가 작아짐. | <ul style="list-style-type: none"> · 전력소비의 평준화가 가능 · 전압 강하 대책으로 유효함. · 회전체이므로, 에너지손실 있음. · 보수의 곤란 |

3. 전력회생용 인버터 시스템의 적용 검토

3.1 회생전력량 예측 simulation

변전소에 설치되는 회생인버터의 적정용량산정을 위해서는 운행 중인 차량의 회생실효를 막고 회생전력 흡수 루트를 만들어 발생하는 회생전력을 측정하는 것이 바람직하지만, 별도의 회생전력 흡수장치와 차량의 회생실효 방지조작이 필요하므로 측정이 용이하지 않다. 따라서, 변전소, 운행노선 및 차량 조건과 다른 노선의 회생률을 활용하여 근사적으로 계산하는 방법과 전력시뮬레이션을 사용해 계산하는 방식이 있다.

가. 근사화 방식

그림3.1은 회생인버터 용량계산을 위한 직류급전변전소의 설치도이고 계산조건은 표 3.1에 나타낸다.

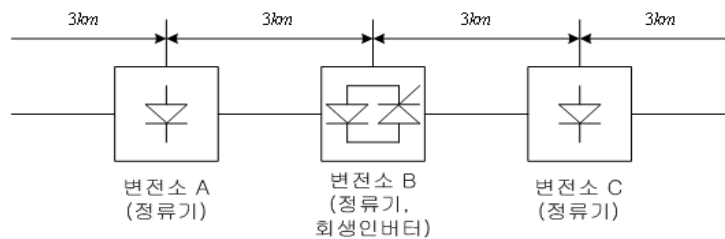


그림 3.1 직류급전변전소 설치도

표 2.1 계산조건

| 항목 | 값 | 항목 | 값 |
|----------------|---------------|--------------------|--------|
| 편성, s | 8(4M4T) | 주행저항, r | 10kg/t |
| 운행시격, t_h | 2.5분 | 최고속도, v_m | 80km/h |
| 중량(만차), w | 48t/량 | 표정속도, v_s | 35km/h |
| 감속도, β | 3.5km/h/s | 회생동작전압, V_{mv} | 1650V |
| 열차톤키로정수, k | 50kW/1000t·km | 전력회생율, λ_1 | 0.21 |
| 동력전달효율, η | 0.85 | 제동유효율, λ_2 | 0.65 |

그림3.1에서 보듯이 12km의 회생담당구간을 가진 1개의 회생인버터가 변전소B에 설치되어 있으며 이 구간에서 운행되는 열차대수 n 은 식(3.1)과 같다.

$$[\text{대수/h}] \quad (3.1)$$

열차톤키로 정수로부터 1시간 최대전력 P 는 다음과 같이 계산된다.

$$P = 2n \cdot s \cdot w \cdot l \cdot (1 + a) \cdot k \quad [\text{kW}] \quad (3.2)$$

여기서 계수 2는 복선구간을 의미하며, a 는 다이어의 분산에 따른 전력변동 표준편차이며 0.1로 계산한다. 기존의 회생인버터가 설치된 변전소로부터 전력회생율 과 제동유�효율을 얻을 수 있다. 전력회생율, λ_1 은 다른 변전소에서 측정된 회생전력 W_1 으로부터 식(3.3)으로 얻어지며 0.20 ~ 0.23값을 갖는다. 제동유�효율, λ_2 은 노선의 회생전력 흡수정도를 나타내는 값으로 식(3.4)와 같으며 0.63 ~ 0.67 값을 갖는다. 여기서 W_2 는 회생담당노선에서 발생하는 모든 회생전력 값으로, 근처역행 차량에서 소비되는 회생전력 및 일부분의 회생실효를 포함한 값이다. 따라서 회생인버터의 용량은 노선의 모든 운행조건을 고려할 때 W_2 보다 큰 값을 선정하면 된다. 전력회생율과 제동유�효율을 사용해 발생가능회생전력 W_2 은 식(3.5)와 같다.

$$\lambda_1 = \frac{W_1}{P} \quad (3.3)$$

$$\lambda_2 = \frac{W_1}{W_2} \quad (3.4)$$

$$W_2 = P \times \frac{\lambda_1}{\lambda_2} \quad [\text{kW}] \quad (3.5)$$

제동시에 흡수되는 기계에너지로부터 회생피크전류, I_B 를 구하기 위해 식(3.6)과 같이 소요제동력, F_B 를 계산하고, 속도 v 의 차량으로부터 발생하는 제동전력은 식(3.7)로 계산한다.

$$F_B = (31 \times \beta - r) \times s \times w \quad [\text{kg}] \quad (3.6)$$

$$P_B = \frac{F_B \times v}{367} \times \eta \quad [\text{kW}] \quad (3.7)$$

식(3.6)과 식(3.7)을 사용하여 소요제동력 P_B 를 얻고, 회생피크전류를 아래와 같이 구할 수 있다.

$$I_B = \frac{P_B}{V_{inv}} \quad [\text{kA}] \quad (3.8)$$

나. 전력시뮬레이션 방식

그림 3.2는 전력시뮬레이션을 사용하여 회생인버터의 용량을 선정방법을 나타낸다. 회생인버터의 설치용량 및 설치개수를 변화시키며 전력시뮬레이션을 수행하고 노선의 회생실효율을 계산한다. 여기서 회생실효율은 회생전력량 중에서 차량에서 소비되는 회생전력의 비율을 의미하는 것으로 식(3.9)와 같다. 계산된 회생실효율로 회생인버터의 최적설치 위치 및 개수를 결정하고 회생전력의 제공평균값과 최고치를 계산한다. 제공평균전력값은 회생인버터의 연속 정격값을 결정하고, 최대회생전력과 제공평균전력값의 비율로 과부하정격을 산정한다.

$$\text{실효율} = \frac{\text{회생전력량} - \text{회생인버터전달전력량}}{\text{회생전력량}} \times 100 \quad (3.9)$$

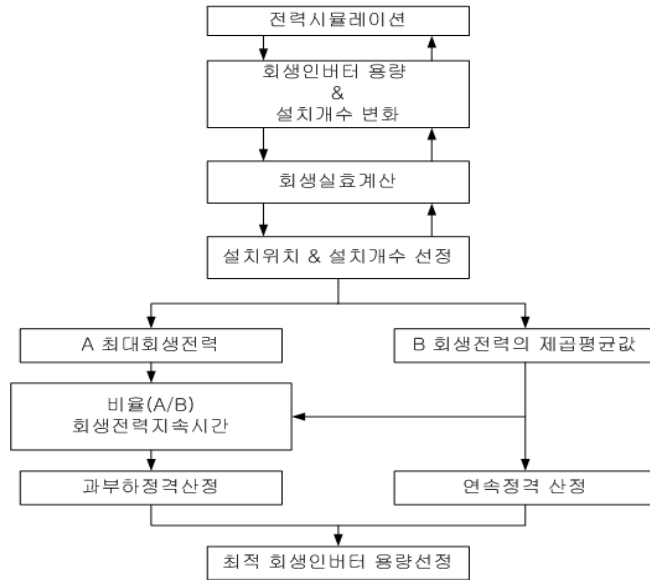


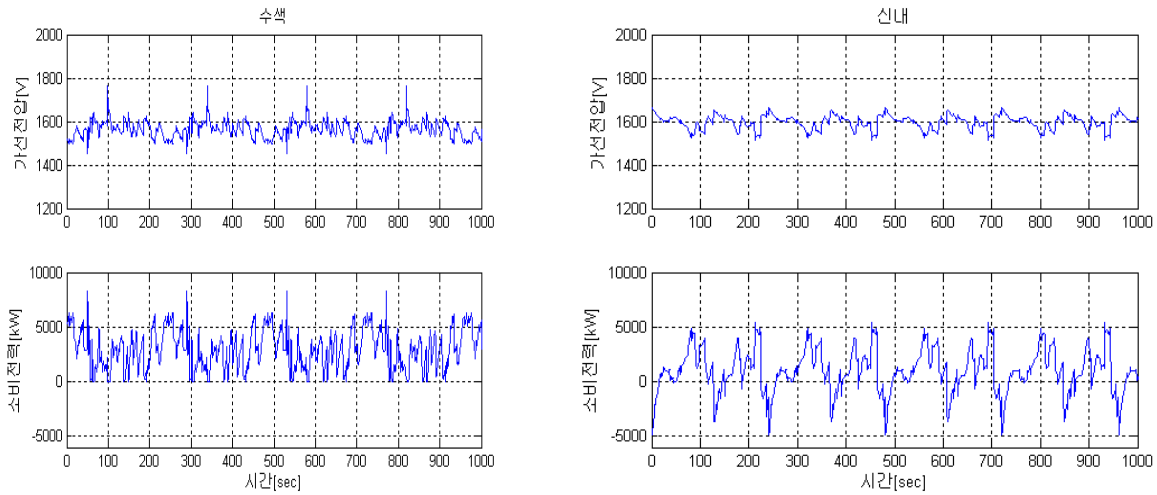
그림 3.2 전력시뮬레이션에 의한 회생인버터 용량선정

서울시 지하철 6호선의 차량 및 노선데이터를 사용하여 전력시뮬레이션을 수행하였으며 시뮬레이션 조건을 표 3.2에 나타낸다.

표 3.2 전력시뮬레이션 조건

| | | |
|-----------|---------|------------------------|
| 차 량 | 차량/편성 | 8(4M4T) |
| | 무 게 | 270.6[ton] |
| | 가속도 | 3.0[km/h/s] |
| | 감속도 | -3.5[km/h/s] |
| | 최고속도 | 100.0[km/h] |
| 운전데이터 | 표정속도 | 35[km/h] |
| | 시 격 | 240[sec] |
| | 역정차시간 | 30[sec] |
| | 교행시차 | 30[sec] |
| | 보조동력 | 168.0[kW] |
| | 전차선저항 | 0.03030[Ω /km] |
| | 무부하전압 | 1620[V] |
| 시뮬레이션 데이터 | 시뮬레이션시간 | 5000 ~ 8600[sec] |
| | 샘플링시간 | 1.0[sec] |
| | 허용오차 | 0.0005[p.u.] |

그림 3.3은 서울지하철 6호선에서 회생인버터의 설치 유무에 따른 변전소의 가선전압과 소비전력파형을 보여준다. 그림 2.3(a)는 회생인버터가 미설치된 수색변전소의 가선전압 및 소비전력파형이며, 전동차의 발전제동으로 인해 발생된 회생전력이 순간적으로 가선전압을 상승시킴을 확인할 수 있다. 그림 3.3 (b)는 회생인버터가 설치된 신내변전소의 경우이며, 회생전력을 변전소에서 흡수하고 가선전압의 변동폭이 감소하였다.



(a) 회생인버터 미설치 변전소

(b) 회생인버터 설치 변전소

그림 3.3 변전소의 가선전압 및 소비전력과형

4. 결론

직류를 전원으로 하는 전철시스템에서 잉여분의 직류전력을 교류 모선으로 보내 고압 배전부하에 전력을 공급하여 에너지를 절감하는 목적뿐만 아니고 인버터 설치로 인한 부가적 목적으로도 널리 사용하여 보다 고급화된 서비스를 제공할 수 있다. 본 논문에서는 전력회생용 인버터 시스템회생인버터의 설치 유무에 따른 변전소의 가선전압과 소비전력과형을 비교한 결과 회생인버터가 미설치된 변전소의 가선전압 및 소비전력은 전동차의 발전제동으로 인해 발생된 회생전력이 순간적으로 가선전압을 상승시킴을 확인할 수 있었으며, 회생인버터가 설치된 변전소의 경우 회생전력을 변전소에서 흡수해 줌으로써 가선전압의 변동 폭이 감소하는 것을 확인하였다.

결국 회생용 인버터의 설치에 전력에너지의 절감뿐만 아니라 전압의 안정도 향상에 유용한 설비라는 결론을 얻었다.

참고 문헌

- 1) 대용량 직류전력 회생인버터 시스템 기술개발에 관한 보고서 2001. 산업자원부
- 2) T. Suzuki, "DC power supply system with inverting substation for traction system using regenerative brakes." IEE Proc. B, Vol.129, Pp18-26,1982
- 3) 전철 직류급전시스템 최적화 조사위원회, 『회생차를 포함한 급전시스템의 현상과 앞으로의 방향』 일본 전기학회 기술보고(II부) 제296호, 1989.
- 4) 전철 직류급전시스템 최적화 조사위원회, 『회생차를 포함한 급전시스템의 현상과 앞으로의 방향』 일본 전기학회 기술보고(II부) 제360호, 1991.
- 5) A.Horn, R.H.Wilkinson, and T.H.R.Enslin, "Evaluation of converter topologies for improved power quality in DC traction substation", ISIE of IEEE, Vol.2, pp.802-807, 1996
- 6) P.J.Randewijk, and J.H.R.Enslin, "Inverting DC traction substation with active power filtering incorporated", PESC, Vol.1, pp.360-366, 1995
- 7) DC Railway Substation Equipment, Kanjinbashi Substation of Kyoto City Express Railway "Karasuma Line", MEIDEN, BA60-2533, MEIDENSHA Corporation
- 8) "Regenerating Power Absorbing Equipment for Railway Systems", 히타치 평론, 2004년4월