

직류 1500V 전철변전소의 회생전력량 측정 및 분석

Measurement and Analysis of Regenerative Energy
in DC 1500V Electric Traction Substation

배창한* · 장동욱* · 김주락* · 한문섭* · 김용기*

Chang-han Bae · Dong-uk Jang · Ju-rak Kim · Moon-seub Han · Yong-ki Kim

Abstract Most of DC 1500V electric railway substations have adopted diode rectifiers to supply stable DC power. However, the diode rectifiers operate in the first quadrant of the voltage-current plane and thus need regenerative inverters which transfer the surplus regenerative power caused by regenerative braking of electric train sets into the grid. In order to select the proper capacity and installation position of regenerative inverter, it needs to investigate the consumed and regenerative energy of the electric traction substations in advance. This paper presents an analysis of regenerative energy in two substations operating in Seoul Seolleung and Kwangju Yangdong substations. DC line voltage and feeder currents are measured for a day to calculate consumed and regenerative power for four feeders. We calculated an amount of regenerative energy consumed in other feeders and estimated the cost reduction in energy consumption due to the reuse of regenerative energy

Keywords : DC electric railway substation, regenerative energy, regenerative braking, regenerative inverter

요 지 본 논문에서는 직류 1500V 지하철 변전소의 가선전압과 피더별 전류량을 측정하고 분석한다. 선봉과 양동시장 변전소들의 피더별 소비 및 회생전력을 측정하고, 피더별로 발생된 회생전력이 타 피더로 전달되는 전력량을 계산하였다. 전철변전소에서 회생전력이 교류될 수 있는 거리를 타 변전소와의 중간지점으로 가정하고, 전동차 1편성의 회생전력량을 기초로 변전소에서 발생하는 총 회생전력량을 근사적으로 계산하였다. 이렇게 얻어진 값과 측정된 피더간 교류된 회생전력량을 사용하여 변전소의 회생전력 실효전력량을 계산하고 회생인버터가 설치된 후 재활용할 수 있는 회생전력량을 근사적으로 얻었다.

주요어 : 직류 전기철도 변전소, 회생에너지, 회생제동, 회생인버터

1. 서론

대부분의 직류 1500V 전철용변전소는 다이오드 정류방식을 채택하여 안정된 직류전력을 제공하지만, 전동차의 회생제동에 따른 잉여 회생전력을 계통으로 전달하기 위해서는 추가로 회생인버터 설비가 필요하다[1-3]. 회생전력 흡수장치인 회생인버터를 다이오드 정류기와 역병렬로 설치하면, 저항기로 소비되는 잉여회생전력을 흡수하고 고압배전단으로 전달해 다시 사용할 수 있다. 이러한 방법은 열로 버려지

는 잉여회생전력을 재이용 할 수 있기 때문에 에너지 절감효과가 있다. 또한 회생인버터는 가선의 회생전력 흡수율을 높임으로서 전동차의 제동 및 ATO 성능을 향상시킬 뿐만 아니라, 브레이크슈의 사용을 줄여 브레이크슈 교체주기를 연장시킬 수 있어, 차량유지보수비용을 줄일 수 있다. 지하공간에서는 브레이크슈 마모에 의한 미세먼지를 줄이고 온도상승을 막을 수 있다. 이러한 장점에도 불구하고 아직까지는 회생인버터의 제작 및 설치비용이 회생전력 재이용으로 얻어지는 비용보다 높기 때문에, 최적용량의 회생인버터를 최적 위치에 설치하는 것이 중요하다. 따라서 직류 전철용변전소에 최적용량의 회생인버터를 설치하기 위해서 반드시 사전에 소비 및 회생전력을 측정하고 분석할 필요가 있다.

† 책임저자 : 정희원, 한국철도기술연구원 도시교통기술개발센터
E-mail : chbae@krti.re.kr

TEL : (031)460-5417 FAX : (031)460-5649

* 한국철도기술연구원

본 논문에서는 서울 선릉지하철 변전소와 광주양동시장 지하철 변전소의 1일 동안의 가선전압과 피더별 전류량을 측정 한 결과를 분석한다. 측정결과로부터 변전소들의 전압-전류 특성곡선을 얻어 병렬 운전되고 있는 다이오드 정류기의 동작특성을 알아보고, 피더별 소비 및 회생전력 평균값과 피더 별로 발생된 회생전력이 타 피더로 전달되는 전력량을 계산 하여 소비전력요금이 감소되는 정도를 계산하였다. 또한 변 전소에서 회생전력이 교류될 수 있는 거리를 타 변전소와의 중간지점으로 가정하고, 전동차 1편성의 회생전력량을 기초 로 변전소에서 발생되는 총 회생전력량을 근사식으로 계산하 였다. 이렇게 얻어진 값과 측정된 피더간 교류된 회생전력량 을 사용하여 변전소의 회생전력 실효 전력량을 계산하고 회 생인버터가 설치된 후 재활용할 수 있는 회생전력량을 근사 적으로 계산한다.

2. 회생전력량

직류급전 전철시스템에서 전동차의 제동 시 운동에너지를 전기에너지로 변환하면서 회생전력이 발생된다. 회생전력은 전동차의 집전장치 전압을 상승시킴으로써 다른 역행 전동차 와의 전압차에 따른 전력수수를 가능하게 한다. 즉 상하행선 을 구분한 피더별로 회생제동 차량에서 발생된 회생전력을 피더간에 교류하여 소모시킬 수 있으며 급전용 변전소의 운 전 전력을 절감하는 효과가 발생한다. 이러한 회생전력을 소 모시킬 수 있는 역행전동차가 존재하지 않는 경우에는, 잉여 회생전력으로 가선전압은 상승하고 불안정해지며 일정 한계 치에 도달하면 전동차의 저항기에서 열로 소모시키고 있다. 이 방법 외에 변전소에 회생인버터를 설치하고 잉여회생 직 류전력을 교류전력으로 변환하여 변전소의 고배부하에서 사 용하면 가선전압을 안정화시키고 에너지 절약을 도모할 수 있을 것이다. 차상과 지상에서 잉여회생전력에 대한 대응방 법은 표 1과 같다. 그림 1은 일반적인 직류 1500V 전철변전 소와 역을 나타낸다. 변전소 A와 B사이에서 전동차가 회생제 동을 실시할 때 발생된 회생전력은 양쪽 변전소의 역행부하 로 공급된다. 변전소 B를 대상으로 회생전력의 피더간 교류 량을 측정한다고 가정하면, 구간 l 에 h 의 시격으로 v_s 의 표정 속도로 운행 중인 편성수(n)는 식(1)과 같다.

Table 1. Response to excess regenerative power

train	consumption	braking chopper resistor
	consumption	braking chopper resistor
substation	conversion	regenerative inverter
	storage	battery, supercapacitor, flywheel

$$n = \left\lceil \frac{60l}{v_s \times h} \right\rceil \tag{1}$$

여기서 $\lceil a \rceil$ 는 a 보다 큰 정수를 의미하며, 거리 l 은 거리(단 위: m), h 는 시격(단위: 분), v_s 는 표정속도(단위: km/h)이다. l 구간에서 1일 동안 발생되는 총 회생전력량은 다음 수식으로 근사할 수 있다.

$$E_g = 2(k-1)E_1 \left\{ \sum_{i=1}^m \frac{n_i T_i}{h_i} \right\} \tag{2}$$

여기서 1일간 m 개의 시격으로 운행되고, T_i 시간 동안을 h_i 시격으로 운행된다. k 는 l 구간 내에 위치한 역의 개수이며, E_1 은 전동차 1편성이 회생제동 시에 발생시키는 회생전력량이다. 변전소의 직류반 측정결과를 활용하여 1일간 피더 간에 교류된 회생전력량과 식(2)로부터 얻어진 1일간 총 회생전력 량을 사용하여 변전소에서 실효되고 있는 잉여 회생전력량을 간접적으로 추정할 수 있다.

$$E_g = E_t + E_r \tag{3}$$

여기서 E_g 는 l 구간에서 발생된 총 회생전력량이며, E_t 는 피 더간 교류된 회생전력량 측정치이다. E_r 은 가선전압을 상승시 키고 전동차의 제동저항기에서 실효되는 전력량이며, 전차선 로의 내부저항에 의한 손실 전력을 포함한다. 식(3)으로부터 회생인버터 설비를 설치 시에 회수할 수 있는 전력량을 근사 적으로 계산할 수 있다. 하지만 계산된 흡수 가능한 회생전력 량에는 급전선로의 내부저항에 의한 손실분도 포함되는 문제 점을 갖고 있다. 이러한 내부저항에 의한 손실전력은 소비전 력이 증가할 때도 커질 뿐만 아니라 피더간 교류되는 회생전 력에도 비례하여 증가한다.

3. 변전소 측정

서울 2호선 선릉변전소와 광주1호선 양동시장변전소에 대 해 1일 동안 직류반의 전압과 전류를 측정 기록하였다. 그림 2에서 보듯이, 변전소의 측정은 직류반 4개의 피더에 설치된 보호계전기 DCCT 출력값과 전력기록장치의 DCPT 출력값 을 DAQ 카드와 노트북 PC에 연결하여 2시간 단위로 데이터

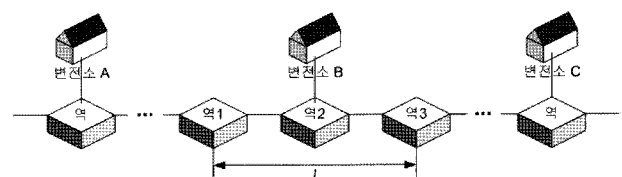


Fig. 1. DC 1500V electric railway stations and substations.

를 저장하였다. 그림 3,4는 변전소 측정 시의 측정용 DAQ 보드, 노트북, 측정화면을 나타낸다.

3.1 전압-전류 특성곡선

그림 5와 6은 양동시장과 선릉변전소의 직류단 전압-전류

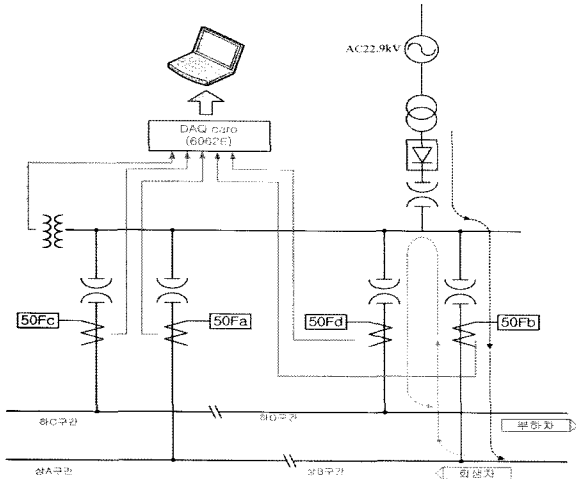


Fig. 2. Substation measurement schematic diagram.



Fig. 3. Photos of measuring equipment.

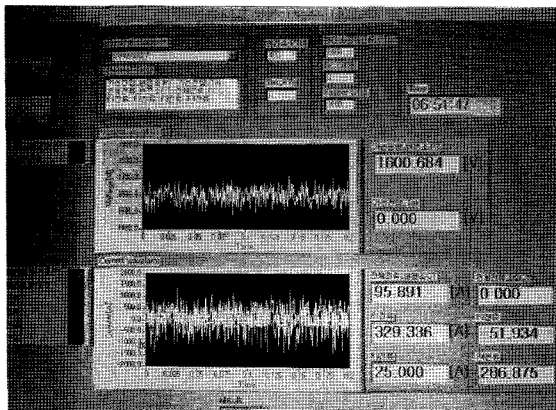


Fig. 4. Recording screen.

특성곡선을 보여준다. 무부하전압(1650V)으로부터 부하전류량이 증가함에 따라서 정류기의 내부임피던스로 인한 전압강하가 커지고 가선전압은 낮아진다. 선릉변전소의 경우 직류단 전압이 일정한 기울기로 감소하지 못하고 꺾이는 현상이 발생된다. 이것은 병렬로 전력을 공급하는 정류기들이 동일하게 부하를 분담하지 않아 발생하는 것으로 사료되나, 다음에 자세히 연구하기로 한다. 그림에서 보듯이 양동시장과 선릉변전소는 잉여 회생전력을 흡수할 수 있는 회생인버터 설비가 갖추어져 있지 않기 때문에 직류단 전체 전류값이 음의 값을 갖지 못하고 대신에 가선전압이 1800[V] 이상까지도 증가됨을 확인할 수 있다. 선릉변전소에 회생인버터의 설치와 병렬구동 다이오드 정류기의 특성을 동일하게 조절하면 이상적인 직류변전소의 전압전류과형을 얻을 수 있을 것으로 사료된다.

3.2 소비 및 회생전력

그림 7과 8은 양동시장변전소와 선릉변전소의 직류단 소비

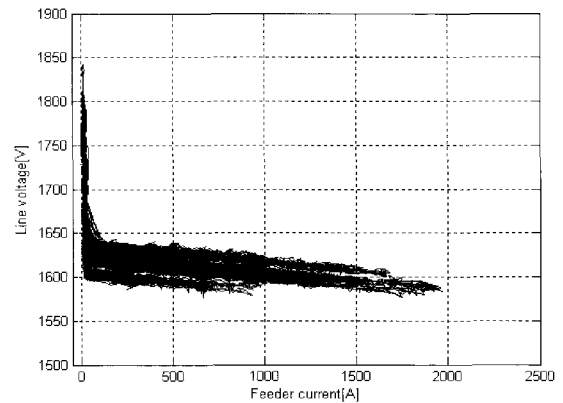


Fig. 5. Total current and catenary voltage characteristic curve in Yangdong Substation.(06:47~08:47)

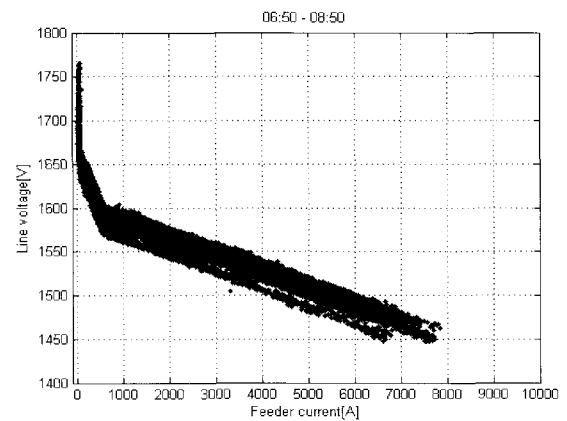
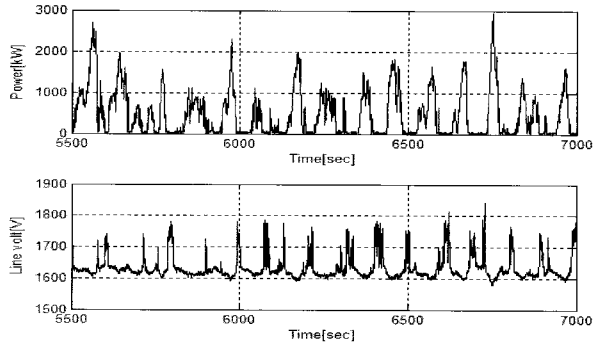
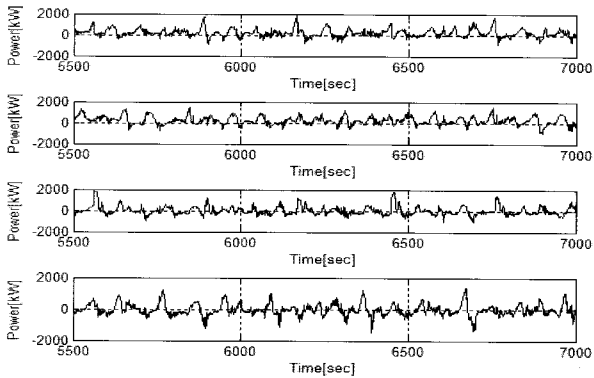


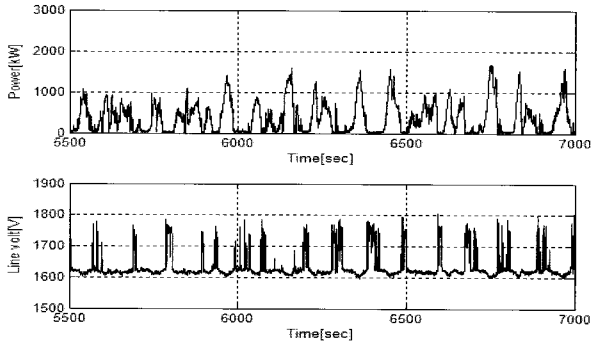
Fig. 6. Total current and catenary voltage characteristic curve in Seolleung Substation.(06:50~08:50)



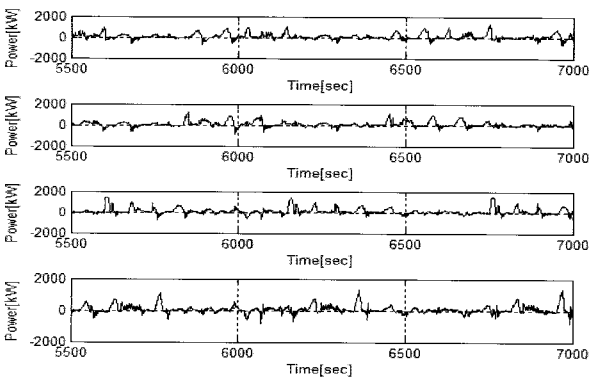
(a) headway = 5 min



(b) headway = 5 min

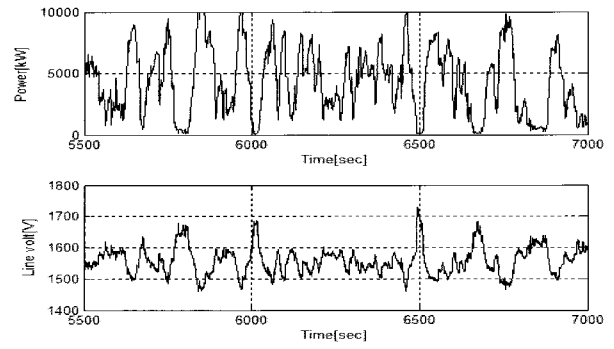


(c) headway = 8 min

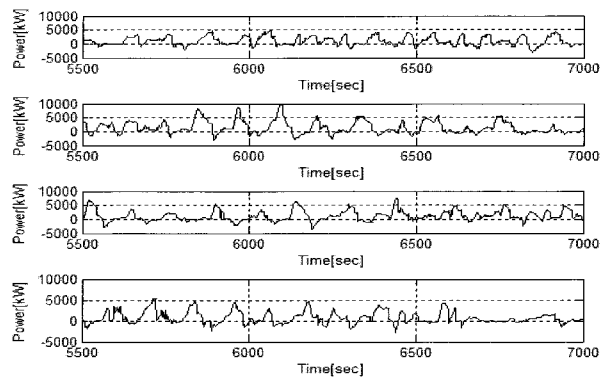


(d) headway = 8 min

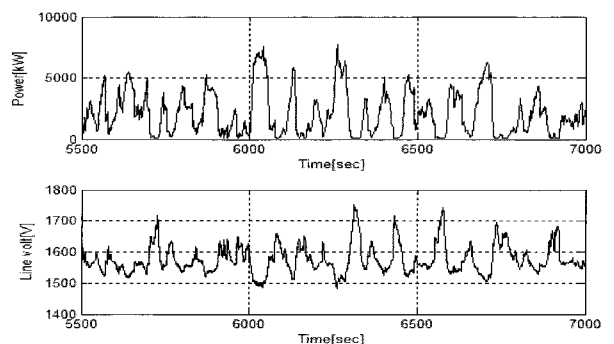
Fig. 7. (a)(c) total consumed power and catenary voltage waveforms, (b)(d) consumed power waveforms of feeder 1 through 4 in Yangdong Substation.



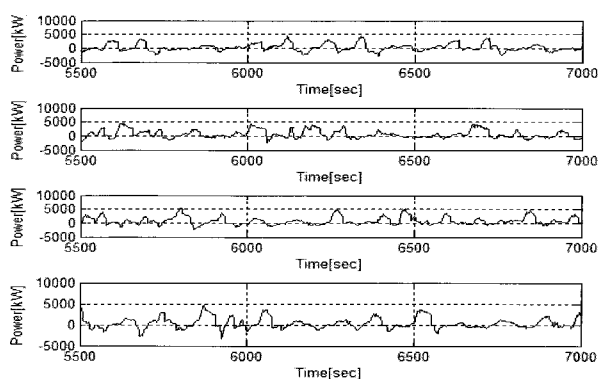
(a) headway = 2.5min



(b) headway = 2.5min



(c) headway = 5min



(d) headway = 5min

Fig. 8. (a)(c) total consumed power and catenary voltage waveforms, (b)(d) consumed power waveforms of feeder 1 through 4 in Seolleung Substation

전력, 가선전압, 피더별 소비 및 회생전력파형을 보여준다. 그림7의 (a)와(b)는 5분 시격으로 운행될 때의 파형들이고, (c)와(d)는 8분 시격으로 운행시의 파형들이다. (a)와(c)에서 보듯이 차량의 역행으로 인한 피더별 소비전력이 발생되지 않는 경우에는 전동차의 회생제동에 따른 잉여 회생전력으로 가선전압은 상승하게 된다. 회생인버터와 같은 잉여 회생전력 흡수 장치가 설치된다면, 가선전압의 상승을 억제하여 안정된 가선전압을 만들 수 있다. (b)와 (d)은 피더별 소비전력 파형들로서, 짧은 시격으로 운행될수록 피더별 소비전력 변동이 크고, 가선전압과 전체 직류반 소비전력 변동도 커진다. 그림 8은 선릉변전소의 경우를 나타내며, (a)와(b)는 2.5분 시격으로 운행 될 때의 전체소비전력, 가선전압, 피더별 소비전력파형 파형들이고, (c)와(d)는 5.5분 시격으로 운행될 때의 파형들을 보여준다. 2.5분 시격으로 운행될 때 가선전압, 소비전력, 피더별 전력 변동이 5.5분 시격으로 운행시 보다 변동이 크다. 선릉변전소의 경우 다양한 종류의 전동차들이 짧은 시격으로 운행되기 때문에 가선전압의 변동이 불규칙적이다.

4. 회생전력량 분석

시간대별로 평균소비전력에 대한 평균 회생전력값을 비율로 나타내면 그림 9와 10과 같다. 선릉변전소의 경우에는 노선의 거리와 구배특성에 따른 회생전력 변화가 확인되고 피더 들간에 비슷한 변동 폭을 갖는다. 또한 양동시장변전소와 비교하여, 운행시격이 짧은 선릉변전소는 동일 피더상의 역행차량부하에서 회생전력을 많이 소모시키고 있다. 양동시장 변전소의 경우, 피더-4는 평균회생전력이 평균역행전력보다도 높은 값을 갖는 경우가 존재하는데, 이것은 피더-4에서 소비전력보다 많은 회생전력이 발생되고 타 피더의 역행차량으로 전송하고 있음을 의미한다. 양동시장변전소의 피더-3,4는 광주1호선 1단계 말단변전소인 쌍촌변전소와 연결되어 회생

전력을 교류할 수 있는 변전소가 쌍촌변전소 1개뿐이다. 따라서 피더-1,2번에 비해 회생전력의 교류를 위한 전동차 편성수가 적고, 발생된 회생전력이 교류되는 곳은 양동시장변전소 밖에 없어 높은 회생전력이 관측된다.

1일 동안 측정된 피더별 전류량과 가선전압 값을 사용하여 피더별 역행 및 회생전력량을 계산한 결과는 표 2와 3에 나타난다. 표 2의 경우, 양동시장 변전소에서는 11,092[kWh/day]의 역행소비전력량이 발생되었으며, 피더간에서 4,415[kWh/day]의 회생전력량이 교류되어 재활용되는 것으로 측정되었다. 이들 값으로부터 양동시장변전소의 직류반에서는 6,678[kWh/day]의 소비전력량을 갖는 것으로 계산되었으며, 측정 월과 동일한 9월의 변전소 SCADA로부터 기록된 일일 평균 전력량은 6,650[kWh/day]로 나타났다. 따라서 양동시장 변전소의 4개 피더들간에 교환함으로써 재활용되는 회생전력량은 역행전력량의 39%이며, 1일간 약 309,000원(70원/kWh)으로 계산된다. 표 3은 선릉변전소의 경우로서, 1일 전력 사용량은 53,180 [kWh/day]이며 피더별 발생하는 역행 및 회생전력량의 비율은 21%이고, 피더들 간의 회생전력교류에 따른 1일간의 전력요금 절감액은 약 1,015,000원(70원/kWh)으로 계산되었다. 측정된 평균 전력량 값이 변전소에서 기록된 값과 일치하지

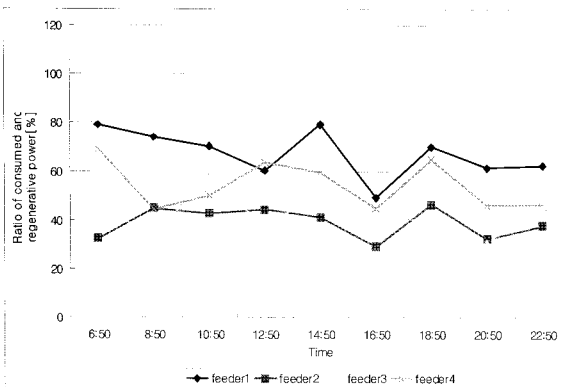


Fig. 9. Ratio of consumed and regenerated energy of each feeder in Seolleung Substation.

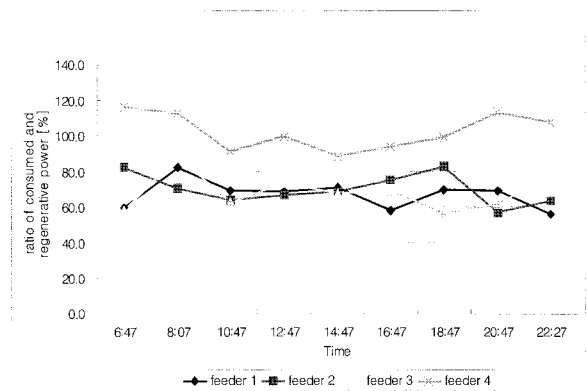


Fig. 10. Ratio of consumed and regenerated energy of each feeder in Yangdong Substation.

Table 2. Energy of each feeder in Yangdong Substation (06:47 ~ 24:08)

	traction energy [kWh/day]	regenerative energy [kWh/day]	consumed energy [kWh/day]	
feeder1	3,277	712	2,565	average consumed power measured at Yangdong substation (2006.09)
feeder2	3,584	700	2,884	
feeder3	2,360	1,426	934	
feeder4	1,871	1,576	295	
total	11,092	4,414	6,678	6,650

Table 3. Energy of each feeder in Seolleung Substation (06:50 ~ 24:50)

	traction energy [kWh/day]	regenerative energy [kWh/day]	consumed energy [kWh/day]	
feeder1	13,846	4,470	9,376	average consumed power measured at Seolleung substation (2005.12)
feeder2	20,481	3,376	17,105	
feeder3	18,305	3,175	15,130	
feeder4	15,060	3,491	11,569	
합계	67,692	14,512	53,180	

않은 이유는 변전소 기록된 전력량과 달리 전철 운영시간보다 부족한 약 18시간 동안의 데이터만으로 계산하였기 때문이며, 변전소 측정 시에 별도의 검정된 전압/전류센서를 사용하지 않았고, 높은 변환비로 인해 IO card와 컴퓨터 기록 오차에 기인한 것으로 사료된다.

회생인버터를 설치할 경우 흡수 가능한 잉여 회생전력량을 추정하기 위해서, 변전소 담당구간, 차량시격, 1회 정차 시 회생전력량, 표정속도 등으로 총 회생전력발생량을 근사적으로 산출하였으며, 이 값에서 실측된 회생전력 교류 전력량을 차감하여 흡수 가능한 회생전력량을 산출하였다. 표 4는 총 회생전력발생량을 계산하는 조건을 나타낸다. 양동시장변전소의 경우, 금남로4가에서 쌍촌역까지의 구간에 대해 고려되었는데, 변전소간의 중간지점의 역을 선택하지 않은 것은 쌍촌 변전소가 1구간의 말단 변전소이며, 양동시장 변전소의 3,4번 피더의 회생전력 발생량이 높기 때문이다. 전동차는 5분과 8분 시격으로 운행되고 1편성이 제동시 발생하는 회생전력량은 차량 설계 자료를 활용하였다. 선릉변전소의 경우에는 삼성역에서 강남역까지의 구간에 대해 2.5분과 5.5분 시격으로 운행하는 조건으로 계산하였다. 표 4의 조건으로 계산된 총 회생전력량, 실제 측정된 피더간 회생전력교류량, 회생실효전력량을 표 5에 나타낸다. 양동시장변전소는 매일 9,910[kWh/day]의 전력량이 실효되며, 선릉변전소는 66,673[kWh/day]의 실효된 회생전력량을 발생하는 것으로 나타난다. 다만, E_r 은 회생실효전력량 뿐만 아니라, 전차선의 전류 흐름에 의한 전력 손실 분을 포함한 값이다.

4. 결론

직류 1500V 전철변전소를 대상으로 가선전압과 피더별 전류량을 측정하고 변전소의 전압·전류특성곡선과 소비·회생

Table 4. Conditions for approximate calculation of total regenerative energy

conditions		Seolleung	Yangdong
distance		3.3km (samsung ~ Gangnam)	4.6km (Geunnamno 4ga ~ Ssangchon)
headway	rush hour	2.5min	5min
	normal hour	5.5min	8min
regenerative energy of a trainset		22.8kWh	9.13kWh
commercial speed		35km/h	35km/h
time		18:00	17:21

Table 5. Analysis results of regenerative energy.

substation	regenerative energy[kWh]			비고 regenerative brake energy of a train set [kWh]
	E_g	E_r	E_r	
Yangdong	14,325	4,415	9,910	9.13
Seolleung	81,185	14,512	66,673	22.8

전력량 분석결과를 제시하였다. 측정된 변전소들의 피더별 소비전력과 회생전력의 평균값을 구하고 최대 소비 및 회생 전력 비율을 비교해 보았으며, 1일간의 소비 및 회생전력량을 계산함으로써 피더간 회생전력 교류에 따른 소비전력량 절감분을 산출하였다. 또한 회생인버터의 입력전력으로 활용될 수 있는 잉여 회생전력량을 근사적으로 예측하기 위해서, 전동차들의 회생제동으로 변전소에서 발생하는 총 회생전력량을 근사화 수식으로 계산하였고 측정된 피더간의 회생전력 교류량값을 사용하여 회생실효 전력량을 근사적으로 산출하였다.

참고 문헌

1. Tzeng, Y.S., Wu, R.N. and Chen, N. (1998). "Electric network solutions of DC transit systems with inverting substations," IEEE Trans. Vehicular Technology, Vol.47, No.4, Nov., pp.1405-1412.
2. Rdndewijk, R.J. and Enslin, J.H.R. (1995). "Inverting DC traction substation with active power filtering incorporated," IEEE-PESC Conf. Rec., Vol.1, pp.360-366.
3. 전철직류급전 시스템 조사위원회, "회생차를 포함한 급전시스템의 현상과 앞으로의 방향", 일본전기학회기술보고, 제296호, 1989.

(2007년 8월 10일 논문접수, 2007년 10월 16일 심사완료)