

DC 1500V용 전철변전소의 회생전력량 분석

Regenerative energy analysis in DC 1500V electric traction substations

배창한* 장동욱* 김용기** 김성태† 김병현††
Bae, Chang-Han Jang, Dong-Uk Kim, Young-Gi Kim, Sung-Tae Kim, Byung-Hyun

ABSTRACT

In DC 1500V electric traction substations, diode rectifiers are commonly used to supply stable DC power with electric train sets. However, it operates in the first quadrant of the voltage-current plane and thus needs 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 line 2 and Kwangju line 1. 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.

1. 서 론

대부분의 직류 1500V 전철용변전소는 다이오드 정류방식을 채택하여 안정된 직류전력을 제공하지만, 전동차의 회생제동에 따른 잉여회생전력을 계통으로 전달하기 위해서는 추가로 회생인버터 설비가 필요하다[1~3]. 직류 전철용변전소에 최적용량의 회생인버터를 설치하기 위해 사전에 소비 및 회생전력을 측정하고 분석할 필요가 있다.

본 논문에서는 서울 선릉지하철 변전소와 광주 양동시장 지하철 변전소의 1일 동안의 가선전압과 피더별 전류량을 측정한 결과를 분석한다. 측정결과로부터 변전소들의 전압-전류 특성곡선을 얻어 병렬운전되고 있는 다이오드 정류기의 동작특성을 확인하고, 피더별 소비 및 회생전력 평균값과 피더별로 발생된 회생전력이 타 피더로 전달되는 전력량을 계산하여 소비전력요금 감소량을 계산하였다. 또한 변전소에서 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 실효 전력량을 계산하고 회생인버터가 설치된 후 재활용할 수 있는 회생전력량을 근사적으로 얻었다.

* 배창한, 한국철도기술연구원, 정회원

E-mail : chbae@krti.re.kr

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

** 한국철도기술연구원, 정회원

† 광주도시철도공사, 정회원

†† 서울메트로, 정회원

2. 회생전력량

직류급전 전철시스템에서 전동차의 제동 시 운동에너지를 전기에너지로 변환하면서 회생전력이 발생된다. 회생전력은 전동차의 집전장치 전압을 상승시킴으로서 다른 역행 전동차와의 전압차에 따른 전력수수를 가능하게 한다. 즉 상하행선을 구분한 피더별로 회생제동 차량에서 발생한 회생전력을 피더간에 교류하여 소모시킬 수 있으며 급전용 변전소의 운전 전력을 절감하는 효과가 발생한다. 이러한 회생전력을 소모시킬 수 있는 역행전동차 존재하지 않는 경우에는, 잉여회생전력으로 가선전압은 상승하고 불안정해지고 일정 한계치에 도달하면 전동차의 저항기에서 열로 소모시키고 있다. 이 방법 외에도 변전소에 회생인버터를 설치하고 잉여회생 직류전력을 교류전력으로 변환하여 변전소의 고배부하에서 사용함으로써 가선전압을 안정화시키고 에너지 절약을 도모한다. 차상과 지상에서 잉여회생전력에 대한 대응방법을 표 1과 같다.

표 1. 잉여회생전력 대응방법

차상	소모방식	발전 제동저항기
지상	소모방식	제동쇼퍼 및 저항기
	변환방식	회생인버터
	저장방식	배터리, 슈퍼캡, 플라이휠

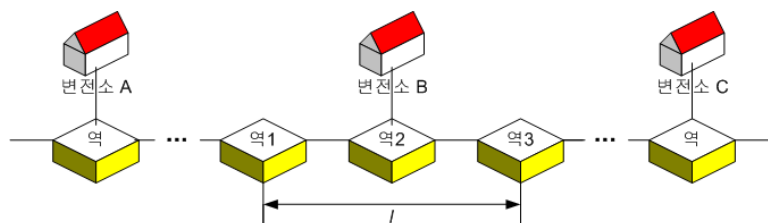


그림 1. 직류전기철도의 역과 변전소

변전소 A와 B사이에서 전동차가 회생제동을 실시할 때 발생된 회생전력은 양쪽 변전소의 역행부하로 공급된다. 변전소 B를 대상으로 회생전력의 피더간 교류량을 측정한다고 가정하면, 구간 l 에 h 의 시격으로 v_s 의 표정속도로 운행 중인 편성수(n)는 식(1)과 같다.

$$n = \lceil \frac{l}{v_s \times h} \rceil \quad (1)$$

여기서 $\lceil a \rceil$ 는 a 보다 큰 정수를 의미하며, 거리 l 의 단위는 m, 시격 h 은 분, 표정속도 v_s 는 km/h이다. 구간에서 1일 동안 발생하는 총 회생전력량은 다음 수식으로 근사할 수 있다.

$$E_g = 2 \times \frac{T_o}{h} \times n \times (k-1) \times E_1 \quad (2)$$

여기서 T_o 는 1일 동안의 영업시간이며 단위는 분이다. k 은 J 구간 내에 위치한 역의 개수이며, E_1 은 전동차 1편성이 회생제동 시에 발생시키는 회생전력량이다. 변전소의 직류반 측정결과를 활용하여 1일간 피더간에 교류된 회생전력량과 식(2)로부터 얻어진 1일간 총 회생전력량을 사용하여 변전소에서 실효되고 있는 잉여 회생전력량을 간접적으로 추정할 수 있다.

$$E_g = E_t + E_r \quad (3)$$

여기서 E_g 는 J 구간에서 발생된 총 회생전력량이며, E_t 는 피더간 교류된 회생전력량 측정치이다. E_r 은 가선전압을 상승시키고 전동차의 제동저항기에서 실효되는 전력량이며, 전차선로의 내부저항에 의한 손실 전력을 포함한다. 식(3)으로부터 회생인버터 설비를 설치 시에 회수할 수 있는 전력량을 근사적으로 계산할 수 있다. 하지만 계산된 흡수 가능한 회생전력량에는 급전선로의 내부저항에 의한 손실분도 포함되는 문제점을 갖고 있다. 이러한 내부저항에 의한 손실전력은 소비전력이 증가할 때도 커질 뿐만 아니라 피더간 교류되는 회생전력에도 비례하여 증가한다.

3. 변전소 측정

선릉변전소와 양동시장변전소에 대해 1일간 직류반의 전압과 전류를 측정하고 기록하였다. 그림 2에서 보듯이, 변전소의 측정은 4개의 피더에 설치된 보호계전기 DCCT 출력값과 직류반 전력기록장치의 DCPT 출력값을 DAQ 카드와 노트북 PC에 연결하여 기록하였다. 그림 3,4는 변전소 측정 시의 측정용 DAQ 보드, 노트북, 측정화면을 나타낸다. 2시간마다 데이터를 분할하여 기록할 수 있는 LabView 프로그램을 작성하였으며, 그림 5와 같다.

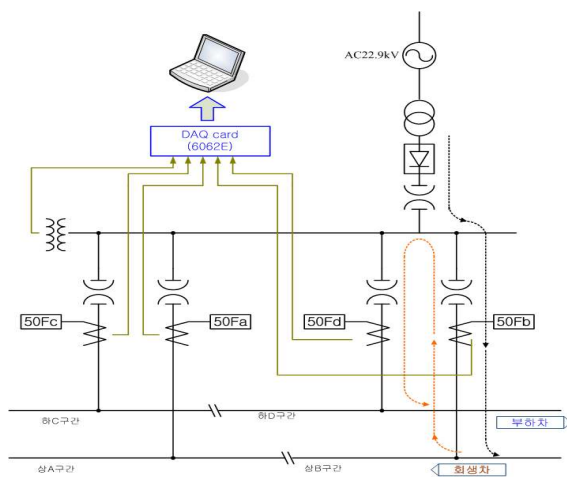


그림 2. 변전소 측정 개략도



그림 3. 측정 장비

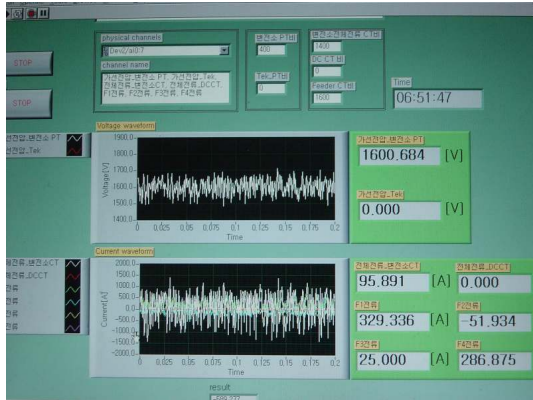


그림 4. 기록 화면

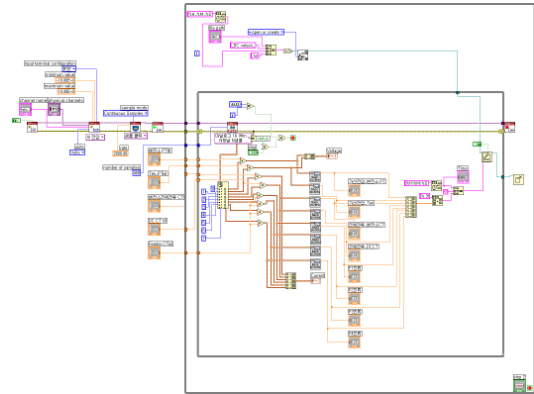


그림 5. LabView 프로그램

3.1 전압-전류 특성곡선

그림 6,7은 양동시장과 선릉변전소의 직류단 전압-전류 특성곡선을 보여준다. 무부하전압(1650V)로부터 부하전류량이 증가함에 따라서 정류기의 내부임피던스 전압강하가 증가되고 직류전압을 낮춘다. 선릉변전소의 경우, 병렬로 운전되는 다이오드정류기들의 전압-전류 특성이 일치하지 않기 때문에 직류단 전압이 일정기울기로 감소하지 못하고 꺾어지는 현상이 나타난다. 즉, 초기 약 500[A]까지의 급격한 감소는 병렬 구동되는 정류기의 불평등 전압 감소분을 의미하며, 병렬구동 정류기의 전압 및 전력 특성이 동일하면 없어진다. 한편, 양동시장과 선릉변전소는 잉여 회생전력을 흡수할 수 있는 회생인버터 설비가 갖추어져 있지 않기 때문에 직류단 전체전류값이 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 있다.

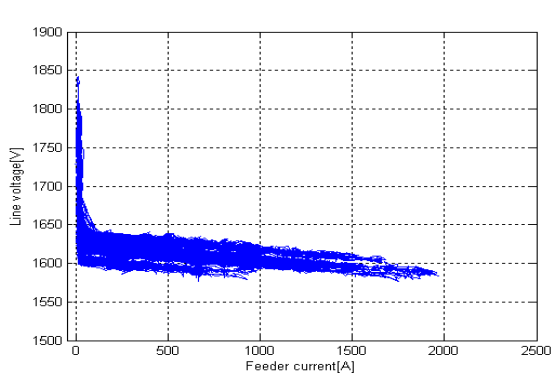


그림 6 양동시장변전소 전체전류와 가선전압 특성곡선(측정시간 : 06:47 ~ 08:47)

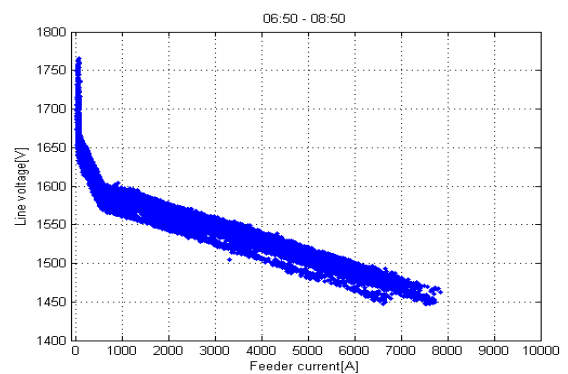
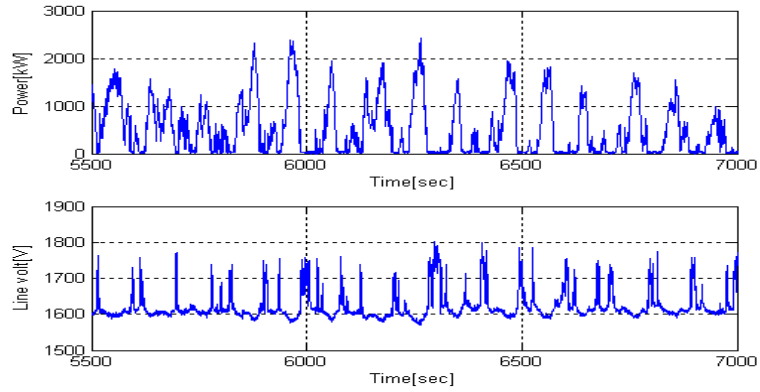


그림 7 선릉변전소 전체전류와 가선전압 특성곡선(측정시간 : 06:50 ~ 08:50)

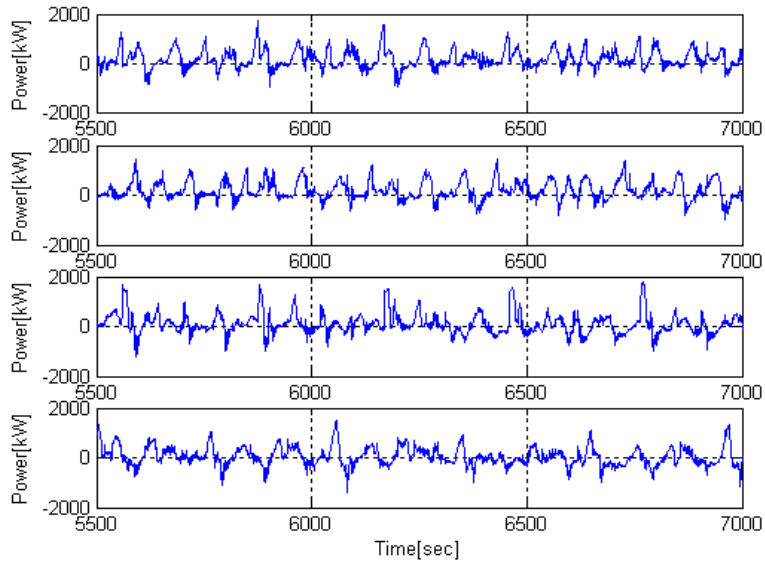
3.2 소비 및 회생전력

그림6과 7은 양동시장변전소와 선릉변전소의 전체소비 전력, 가선전압, 피더별 소비 및 회생전력과형을 보여준다. (a)는 전체 소비 전력과 가선전압과형으로 소비전력이 발생되지 않는 경우에는 대부분 전동차의 회생전력으로 가선전압이 상승한다. 또한 양동시장변전소의 경우에는 동일 차종이 8분 또는 10

분 시격으로 운행하기 때문에 전동차의 회생제동 발생 시에 가선전압이 상승되는 시점을 명확히 확인할 수 있다. 반면에 선릉변전소의 경우 다양한 종류의 전동차와 짧은 시격으로 운행되기 때문에 가선전압의 변동이 불규칙적이다. (b)는 피더별 소비전력과형을 나타내며, 한쪽 피더에서 발생된 회생전력이 다른 쪽 피더의 소비전력으로 재활용되고 있으며 피더별 회생전력교류가 없는 경우, 즉 회생전력을 소비할 수 있는 부하가 타 피더에 존재하지 않는 경우에 가선전압은 상승함을 보여준다.

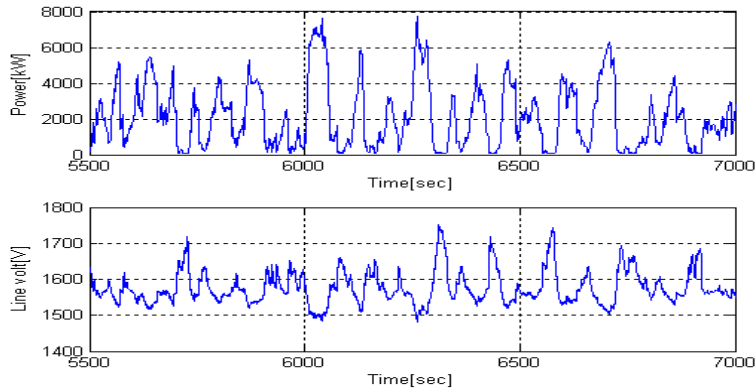


(a) 전체소비전력과 가선전압과형

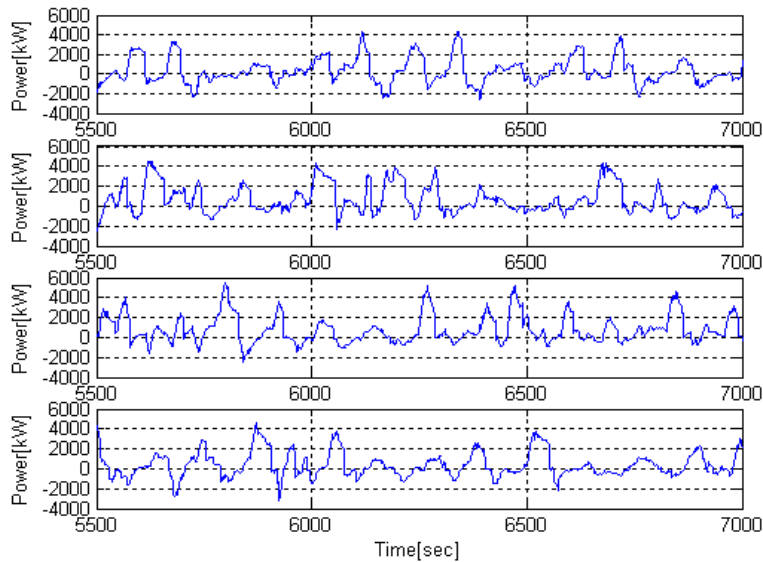


(b) 피더1~4의 소비전력과형

그림 8. 양동시장 변전소의 소비전력 및 가선전압 과형



(a) 전체소비전력과 가선전압과형



(b) 피더1~4의 소비전력과형

그림 9. 선릉변전소의 소비전력 및 가선전압

4. 회생전력량 분석

시간대별로 평균소비전력에 대한 평균회생전력값을 비율로 나타내면 그림 8,9와 같다. 선릉변전소의 경우에는 노선의 거리와 구배특성에 따른 회생전력 변화가 확인되고 피더들간에 비슷한 변동폭을 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 존재하며, 이것은 피더-4에서 소비전력보다 높은 회생전력이 발생되고 타 피더의 역행차량으로 전송하고 있음을 의미한다. 양동시장변전소의 피더-3,4는 광주1호선 1단계 말단변전소인 쌍촌변전소와 연결되었기 때문에 회생전력을 교류할 수 있는 변전소가 쌍촌변전소 1개뿐이고 피더-1,2번에 비해 회생전력을 교류를 위한 전동차 편성수가 적다. 또한 쌍촌변전소에서 호남대입구역까지는 연속된 하구배구간이며, 발생된 회생전력이 교류되는 곳은 양동시장변전소 밖에 없어 높은 회생전력을 만들기 때문에 나타난다.

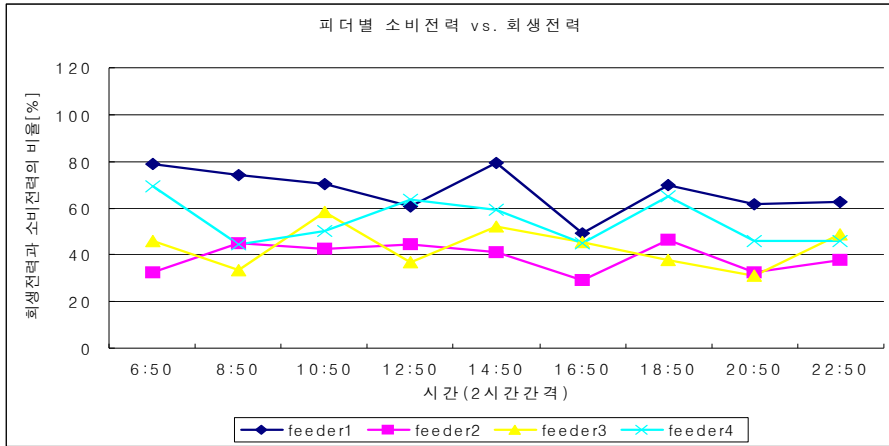


그림 10. 선릉변전소의 피더별 소비 및 회생전력 비율

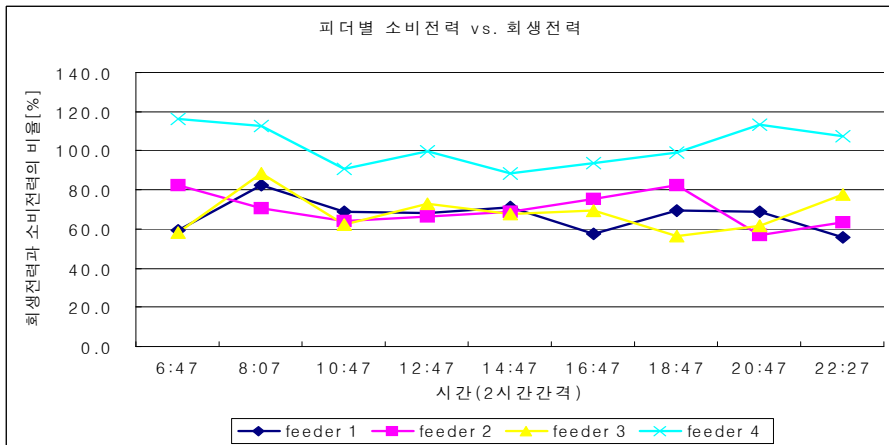


그림 11. 양동시장변전소의 피더별 소비 및 회생전력비율

1일 동안 측정된 피더별 전류량과 가선전압 값을 사용하여 피더별 역행 및 회생전력량을 계산한 결과는 표 3,4에 나타난다. 양동시장 변전소에서는 측정된 데이터로부터 계산된 전력사용량은 8,494[kWh/day]이고, 피더들간에 서로 교환함으로써 재활용되는 회생전력량은 3,718[kWh]다. 이 값은 소비전력량의 27%에 해당하며 1일간 약 260,000원(70원/kWh) 정도이다. 표4는 선릉변전소의 경우로서 측정된 데이터로부터 계산된 선릉변전소의 1일 전력 사용량은 53,180[kWh/day]이며 소비전력량에 대한 회생전력량의 비율은 43%이고, 피더간 회생전력교류에 따른 1일간의 전력요금 절감액은 약 1,015,000원(70원/kWh)이다.

표 2. 양동시장변전소의 피더별 전력량 (측정시간 : 06:47 ~ 24:08)

	역행전력량 [kWh/day]	회생전력량 [kWh/day]	소비전력량 [kWh/day]	변전소에서 기록한 1일 평균 소비전력량 (9월)
피더-1	3,277.7	712.9	2,564.8	
피더-2	3,584.0	700.4	2,883.6	
피더-3	2,360.2	1,426.1	934.1	
피더-4	1,871.9	1,576.9	295	
합계	11,093.8	4,416.3	6,677.5	6,650

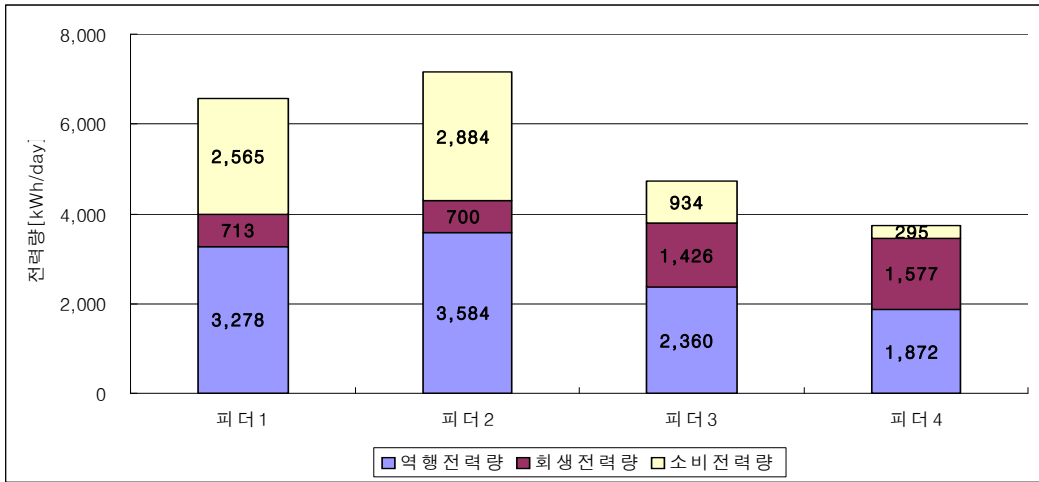
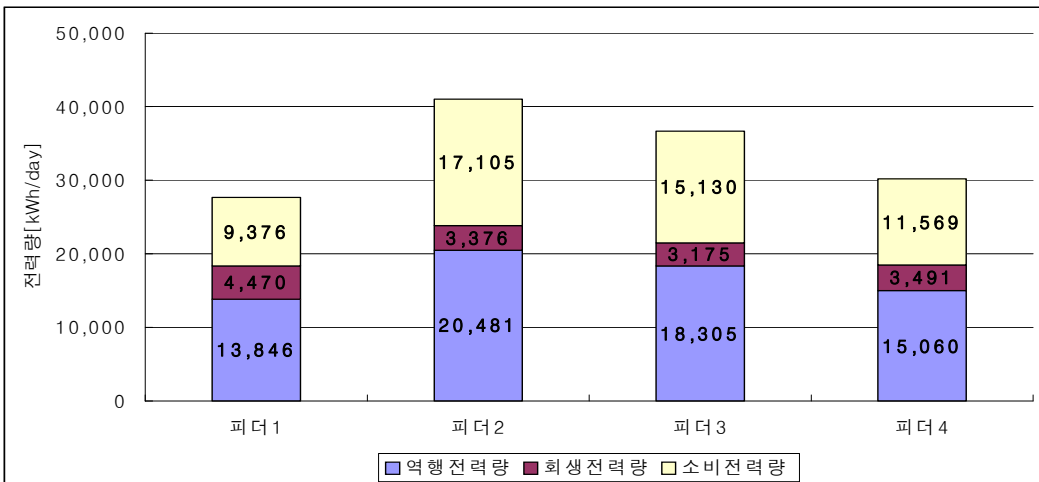


표 3. 선릉변전소의 피더별 역행 및 회생전력량 (측정시간: 06:50 ~ 24:50)

	역행전력량 [kWh/day]	회생전력량 [kWh/day]	소비전력량 [kWh/day]	변전소에서 기록한 1일 평균 소비전력량 (12월)
피더-1	13,846	4,470	9,376	
피더-2	20,481	3,376	17,105	
피더-3	18,305	3,175	15,130	
피더-4	15,060	3,491	11,569	
합계	67,692	14,512	53,180	69,580



회생인버터를 설치할 경우 흡수가능한 잉여 회생전력량을 추정하기위해서, 변전소 담당구간, 차량시격, 1회 정차시 회생전력량, 표정속도 등으로 총 회생전력발생량을 근사적으로 산출하였으며, 이 값에서 실측된 회생전력 교류 전력량을 차감하여 흡수 가능한 회생전력량을 산출하였다. 표4는 총 회생전력발생량을 계산하는 조건을 나타낸다. 양동시장변전소의 경우, 금남로4가에서 쌍촌역까지의 구간에 대해 고려되었는데, 변전소간의 중간지점의 역을 선택하지 않은 것은 쌍촌변전소가 1구간의 말단 변전소이고, 양동시장 변전소의 3,4번 피더의 회생전력 발생량이 높기 때문이다. 전동차는 8분시격으로 운행되고 1편성이 제동시 발생하는 회생전력량은 차량 설계자료를 활용하였다. 선릉변전소의 경우에는 삼성역에서 강남역까지의 구간에 대해 5분 시격으로 운행하는 조건으로 계산하였다. 표4의 조건에서 얻어진 총 회생전력량, 실제 측정된 피더간 회생전력교류량, 회생실효전력량을 표 5에 나타낸다. 양동변전소는 매일 5,740kWh의 전력량이 실효되며, 선릉변전소는 15,310[kWh/day]의 실효된 회생전력량을 발생하는 것으로 나타난다. 다만, E_r 은 회생실효전력량 뿐만아니라, 전차선의 전류 흐름에 의한 전력손실 분을 포함한 값이고, 일반적으로 전차선 저항에 의한 손실분보다는 가선전압을 상승시키고 전동차에서 실효되는 잉여회생전력보다는 적다.

표 4. 총 회생전력량 근사계산 조건

조건	선릉	양동시장	비고
거리	3.3km (삼성 ~ 강남)	4.6km (금남로4가 ~ 쌍촌)	
시격	5분	8분	
1편성 회생전력량	22.8kWh	9.13kWh	차량 설계자료
표정속도	35km/h	35km/h	
운행시간	17:21	18:10	측정시간과 동일

표 5. 회생전력량 분석

변전소	회생전력량[kWh]			비고 1편성 제동시에 발생된 회생전력량
	E_g	E_t	E_r	
양동시장	9,459	3,719	5,740	9.13
선릉	29,822	14,512	15,310	22.8

5. 결 론

직류용 전철변전소를 대상으로 가선전압과 피더별 전류량을 측정하였으며, 변전소의 전압·전류특성 곡선과 소비·회생전력량 분석결과를 제시하였다. 측정된 변전소들의 피더별 소비전력과 회생전력의 평균값을 구하고 최대 소비 및 회생전력 비율을 비교해 보았으며, 1일간의 소비 및 회생전력량을 계산함으로써, 피더간 회생전력 교류에 따른 소비전력량 절감분을 계산하였다. 서울 선릉변전소와 광주 양동시

장변전소의 경우 4개의 피더간에 회생전력교류량은 전체 소비전력량의 27%와 43%로 나타났다. 또한 전동차의 회생제동으로 각각의 변전소에서 발생하는 총 회생전력량을 근사화 수식으로 계산하였으며, 측정된 피더간의 회생전력교류량을 사용하여 회생실효 전력량을 근사적으로 산출하였다.

참고문헌

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

감사의 글

본 연구는 국가교통핵심기술개발사업에서 지원된 차세대 전철시스템 에너지회생장치개발 과제에 의해 수행되었으며 지원에 감사드립니다.