

# 정전압 DC 급전시스템에서의 회생전력

## Regenerated Power in Fixed voltage DC Electric Power Supply System

정상기\*      이병송\*\*      정락교\*\*\*      박성혁\*\*\*\*      김국진\*\*\*\*\*  
Chung, S.G.      Lee, B.S.      Jeong, R.G.      Park, S.H.      Kim, K.J.

### ABSTRACT

In this study we examined the method to estimate numerically the amount of the regenerated power and the excess regenerated power produced in the DC electric power supply system for the urban light rail transit system. And their economic feasibilities are also studied. For this study DC electric power supply system is simulated and the numerical analysis of the regenerated power and the excess regenerated power are conducted. The study result on the sample system shows that the facility to consume the excess regenerated power or the inverting equipment to reuse the excess regenerated power in the electric substation is feasible economically.

### 1. 서론

근래의 DC 전기철도의 추진은 VVVF로 제어되고 회생제동이 가능하다. 회생제동은 에너지를 재활용할 수 있게 할뿐더러 기계식 브레이크의 사용을 그만큼 줄임으로써 유지보수 비용을 줄이는 일거양득의 매우 이상적인 시스템이다. 그러나 이 회생제동이 가능하려면 열차가 회생제동을 할 때에 생산되는 회생전력이 반드시 소모되어야 한다. 열차가 회생제동 시에 발생하는 회생전력은 우선 동일 노선에서 추진하고 있는 열차의 추진 에너지로 사용되고 그렇게 하고도 남은 회생전력(잉여회생전력)이 있는 경우는 대체로 다음의 4가지로 처리된다.

(1) 변전소에 설치되어 있는 인버터에서 AC 전원으로 바뀌어져 활용된다. (2) 차량에 장착된 저항기로 소모시킨다. (3) 변전소에 설치되어 있는 저항기에서 소모된다 (4) 회생제동이 기계식제동으로 전환된다. 위의 4가지 방법 중에서 (1)의 방법은 가장 바람직하나 설비투자비용이 제일 크고, 전환된 AC 전압에 고조파가 포함되어 사용에 제한이 있으며 (2) 및 (3)의 방법은 설치비는 (1)의 방법에 비해 저렴하나 잉여회생에너지가 활용되지 않고 버려지므로 그만큼 비경제적이다. (4)의 방법은 설치비는 없으나 잉여회생에너지가 활용되지 않고 버려지고 기계식제동장치가 더 자주 동작함으로써 기계식 제동장치의 유지보수비용이 더 커진다. 시스템을 비교 선정할 때는 기술적 타당성, 경제적 타당성이 비교 검토되며, 또한 시스템의 신뢰성 및 안정성이 보다 우선하여 고려될 것이다. 본문에서는 위의 4가지 방법의 경제성의 비교 검토에 필요한 자료를 제시한다. 즉 열차가 얼마만큼의 회생전력을 내고 잉여회생전력은 얼마나 되나? 에 관한 열차운행 시뮬레이션 결과를 제시한다. 시뮬레이션은 한국철도기술

\* 한국철도기술연구원 경량전철연구팀 책임연구원, 회원  
\*\* 한국철도기술연구원 경량전철연구팀 책임연구원, 회원  
\*\*\* 한국철도기술연구원 경량전철연구팀 선임연구원, 회원  
\*\*\*\* 한국철도기술연구원 경량전철연구팀 선임연구원, 회원  
\*\*\*\*\* 현대중공업 기전연구소 책임연구원, 회원

연구원에서 수행중인 경량전철기술개발사업의 목표노선과 개발차량의 특성을 이용하였다.

## 2. 본문

### 2.1 급전시스템 시뮬레이션

급전시스템의 시뮬레이션은 그림\_1과 같은 흐름으로 진행된다. 먼저 차량, 노선등의 자료를 기초로 TPS(Train Performance Simulation)을 수행하여 1 편성차량의 모든 역간 운전곡선을 정하고 운전다이아에서 지정하는 시격, 교행시차(Cross Time) 및 역 정차시간에 의해서 차량을 노선에 주행시킨다. DC Loadflow 모듈에서는 앞 Procedure에서 일어난 각 차량의 위치와 Demand Power를 급전시스템에 추가하여 조류계산(Loadflow)을 한다.

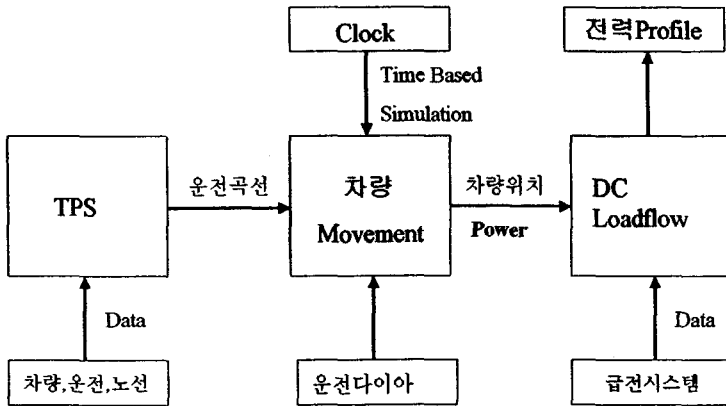


그림 1 급전시스템 Simulation Flow

### 2.2 급전변전소의 모의

시스템 내의 전체 회생전력이 점점 커져 시스템 내의 소모전력 보다 커지게 되면 남은 전력은 급전변전소로 되돌아간다(등가회로 상에서는). 그러나 단방향 다이오드 정류기를 채택하고 있는 급전변전소에서는 다이오드가 역 바이어스 되어 사실상 급전변전소의 전원은 시스템으로부터 분리된다. 시뮬레이션에서도 조류계산 후에 각 변전소의 전압을 검토하여 시스템전압(무부하 전압) 보다 높으면 변전소전원을 시스템에서 분리시키고 다시 조류계산을 하였다. (그림1 참조)

### 2.3 회생차량의 모의

회생전력이 점점 커지면 모든 급전변전소의 전압이 시스템 전압보다 높아져 모든 급전변전소의 정류기가 역바이어스로 되고 차량의 가선전압도 점점 높아진다. 일부 차량에서는 회생전력에 의해 차량 내의 인버터 DC단의 전압이 일정수준 이상이 되면 회생전력의 일부를 저항기로 소모시켜 인버터 DC 전압을 제어한다. 저항기가 없는 차량은 인버터 DC단의 전압이 어느 일정수준 이상이 되면 가선으로의 차단기를 연다. 이것은 차량이 시스템에서 분리됨을 의미한다. 이 2가지 경우 모두 다 차량의 DC단 전압이 일정수준 이상이 되면 회생제동이 더 이상 가능하지 않게 된다. 본 시뮬레이션에서는 전자의 차량을 모의하였다. 즉 차량의 DC 전압이 일정수준 이상이 되면 더 이상은 오르지 못하도록 제어하도록 하였다.

### 2.4 시뮬레이션조건

시뮬레이션에서 적용한 노선, 전력공급시스템 및 차량은 한국철도기술연구원에서 개발하고 있는 차량과 목표노선, 전력공급시스템을 이용하였다(이 후 참조시스템이라 함)[1]. 시뮬레이션에서 차량의 최대허용전압은 시스템 전압의 110%로 하였고, 110%시스템전압에서 완전회생 제동이 안 되는 경우(회생제동과 기계식제동의 혼합)는 회생에너지가 전부 이용 안 되는 것으로 간주하였다. 시뮬레이션에서 이용되는 차량운전곡선은 차량이 목표노선을 30km/h의 표정속도로 주행할 경우의 운전곡선을 이용하였다. TPS 결과 및 운전곡선은 도표\_1 및 그림\_2와 그림\_3과 같다.

도표1. 목표노선에 대한 TPS 결과

----- TPS 요약 보고	
총 주행거리=21000[m]	총 주행시간=2560.71[s]
표정속도=29.52[km/h]	역행 에너지= 62.7[kwh]
역행시의 I <sub>rms</sub> = 215.2[A]	역행시 평균전류= 117.5[A]
총 회생에너지= 16.1[kwh]	회생시 I <sub>rms</sub> = 95.2[A]
회생시 평균전류 = -30.3[A]	총 Aux. 에너지 = 21.7[kwh]
Peak 전류 = 716.6[A] at location 5892[m]	

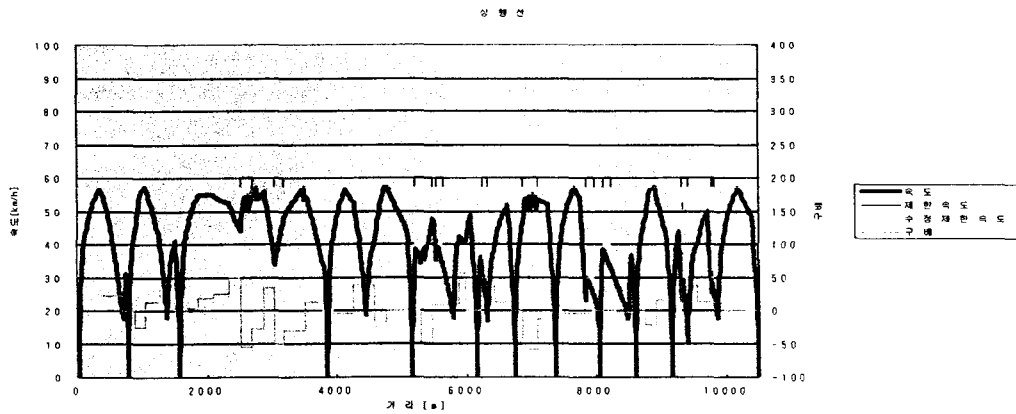


그림 2. 운전곡선, 상행선

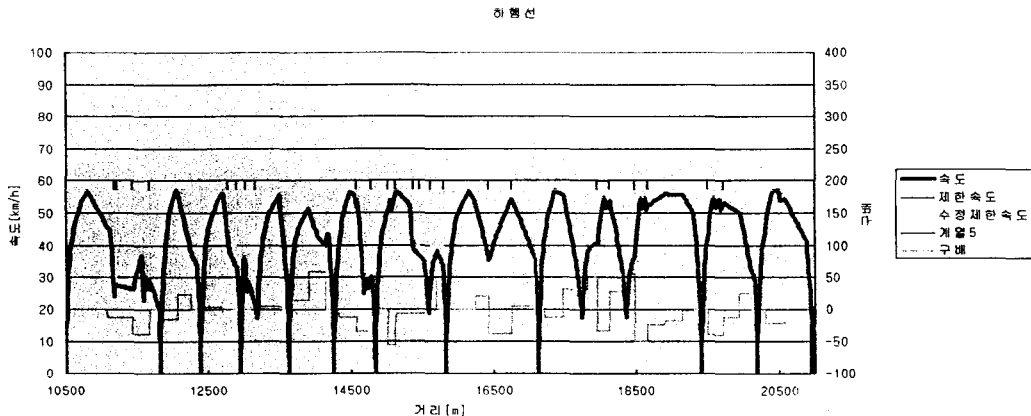


그림3. 운전곡선 하행선

## 2.5 시물레이션결과

### 2.5.1 회생제동 및 기계식 제동장치 동작시간 현황

도표 2~4에서는 편성별 에너지 이용현황 시물레이션 결과를 보여준다. 편성별 회생에너지 이용현황에는 각각의 편성차량이 목표노선을 1회 왕복할 경우 발생하는 회생에너지 발생시간 및 에너지 분석이다.

회생제동시간과 기계식제동장치동작시간의 합은 총 제동시간이다. 그러므로 회생제동을 많이 하면 할수록 기계식 제동장치의 동작시간은 줄어들고 따라서 유지보수비용도 줄어든다. 도표 2~4에서는 각 시격 별로 기계식 제동장치 동작시간을 보여준다. 기계식 제동장치 동작시간은 각각의 편성차량이 목표노선을 1회 왕복할 경우 가능한 회생제동시간을 총 제동시간에서 뺀 값이다. 참조시스템에서의 총 제동시간은 369 초이다(TPS 결과, 도표\_1 참조). 한편 도표\_1에 의하면 차량이 2분 시격으로 운행될 경우 1회 왕복 시에 58초의 기계식 제동장치 시간이 필요하다. 2분 시격 운행에서는 100% 회생제동이 되나 58초간은 열차가 10km/h 미만의 속도로 주행하므로 이 기간 동안은 회생제동이 되지않는다. 한편 10분 시격으로 운행할 경우는 200초간 기계식 제동장치 동작시간이 필요하다. 여기에 추가되는 142초의 시간 동안에는 회생제동을 사용할 수 없으므로 기계식 제동장치를 사용하여야 함을 의미한다. (개발되고 있는 경량전철차량에는 잉여회생전력 소모를 위한 별도의 저항기가 없음). 도표\_3 및 도표\_4 는 각각 다른 Cross Time에서의 결과이다. 더 많은 기계식 제동장치의 동작시간은 더 많은 기계식 제동장치의 유지보수비용을 필요로 한다. 그러므로 경량전철의 급전변전소에 잉여회생전력 소모설비를 할 것인가? 에 대한 경제성 검토 시에는 잉여회생전력 소모설비의 초기투자비와 운영비를 각 차량의 제동장치 유지보수비용의 증가분과 비교검토 되어야 한다. 도표\_2의 기계식 제동시간에서 ( ) 안의 수 311은 회생제동가능 시간이다. 회생제동가능 시간이 총 제동시간보다 작은 이유는 시속 10km/h 이하의 속도에서는 회생제동이 불가능하기 때문이다. 도표\_2에서 시격 10분인 경우에는 기계식 제동시간이 총 운행시간의 7.18%로 되어 있다. 이것은 열차가 10000시간 운행하면 기계식 제동장치 동작시간이 718시간이 됨을 의미한다.

유감스럽게도 경량전철차량의 10000시간 주행 당 제동장치 유지보수비용에 관한 자료를 갖고 있지 않아서 숫자적으로 경제성을 비교하지는 못하였지만, 기계식 제동장치 동작시간이 시격에 따라 급격히 증가함으로 개발중인 경량전철 시스템에서는 급전변전소 중 일부에 잉여전력 소모설비를 갖추는 것이 타당하리라고 판단된다.

도표2. 시격별, 1편성차량의 회생에너지 이용 현황/ 1회왕복(21km,2571초 주행), Cross Time=0초

시격[분]		1편성 운행	회생가능량 중 미 사용량(1편성 당)					
			2	3	4	6	10	15
기계식제동 시간 [초]	총 제동시간=369 회생제동 가능시간=311	58	74	86	127	200	265	
총 운행시간 대비 [%]	총 운행기간(2571초) [%]	2.3	2.9	3.3	4.9	7.8	10.3	
에너지	[kwh]	회생가능량=14.84kwh	0	0.81	1.76	3.91	7.18	10.42
	%	100.0	0	5.5	11.9	26.3	48.4	70.4

도표3. 시격별, 1편성차량의 회생에너지 이용 현황/ 1회왕복(21km,2571초 주행),  
Cross Time=30초

		회생가능량 중 미 사용량(1편성 당)						
시격[분]	1편성 운행	2	3	4	6	10	15	
기계식제동 시간 [초]	총 제동시간=369 회생제동 가능시간=311	58	59	96	100	190	229	
총 운행시간 대비 [%]	총 운행기간 2571초	2.3	2.3	3.7	3.9	7.4	8.9	
에너지	[kwh]	회생가능량=14.84kwh	0	0.09	2.01	2.43	7.50	9.30
	%	100.0	0	0.6	13.5	16.4	50.5	62.7

도표4. 시격별, 1편성차량의 회생에너지 이용 현황/ 1회왕복(21km,2571초 주행),  
Cross Time=60초

		회생가능량 중 미 사용량(1편성 당)						
시격[분]	1편성 운행	2	3	4	6	10	15	
기계식제동 시간 [초]	총 제동시간=369 회생제동 가능시간=311	58	67	104	111	190	239	
총 운행시간 대비 [%]	총 운행기간 2571초	2.3	2.6	4.0	4.3	7.4	9.3	
에너지	[kwh]	회생가능량=14.84kwh	0	0.475	2.643	3.209	6.941	9.472
	%	100.0	0	3.2	17.8	21.6	46.8	63.8

열차운행시간 대비 기계식제동시간 [%]

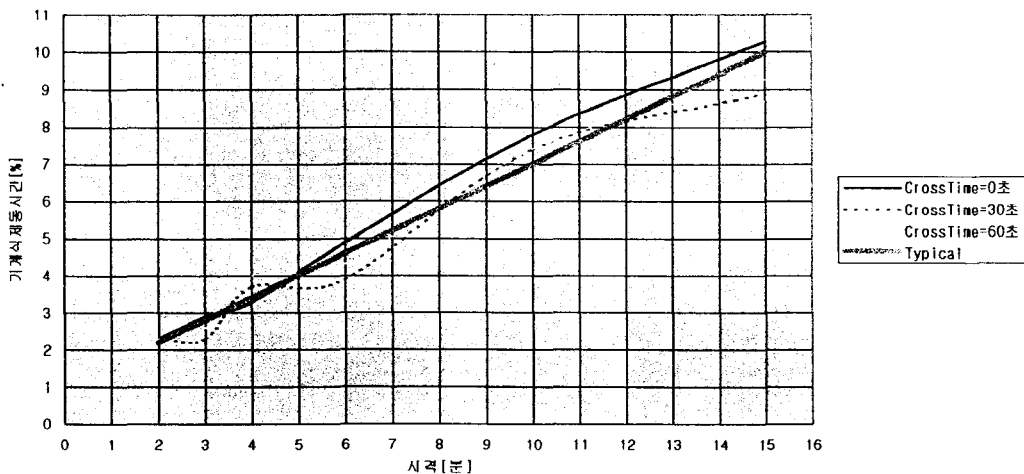


그림 3. 열차운행시간대비 기계식제동장치 동작시간

### 2.5.2 회생제동 및 기계식 제동장치 동작시간 현황

도표 2~4의 편성별 회생에너지 이용현황에는 각각의 편성차량이 목표노선을 1회 왕복할 경

우 발생하는 회생에너지 발생시간 및 에너지 분석이다. 에너지분석에서 회생가능 량은 1편성의 차량이 목표노선을 1회 왕복 시에 발생할 수 있는 총 회생에너지에서 회생제동 가능시간 동안의 차량보조동력에 필요한 에너지를 뺀 값이다. 도표\_2에서보면 2분 시격으로 운행 시 회생가능 에너지를 모두 활용한다. 그러나 10분 시격으로 운행 시는 회생가능 에너지 중 50% 정도 밖에 이용되고 있지 않음을 알 수 있다. 그림\_4는 각 Cross Time(교행시차) 별, 시격 별 에너지 미사용 율의 변화를 그래프로 보여주고 있다. 도표\_5에서는 Cross Time=0에서의 시간당 회생에너지의 분석이고 그림\_5는 Cross Time=0에서의 회생에너지 활용 율을 각 시격 별로 보여준다. 가용회생에너지 대비 회생에너지 활용 율은 개별차량의 경우와 동일한 백분 율을 보이는 것은 당연하다. 총 전력공급량 대비 회생에너지 미사용 율은 미활용 에너지에 대한 값어치를 평가하는데 유용한 자료이다. 예를 들어 10분 시격에 에너지 미 활용 율이 11.5%라 함은 전기차량 운영회사에서 1000원의 전기료를 한국전력에 냈을 때 115원은 회생에너지 활용으로 절약할 수도 있었을 금액을 나타낸다. 6분 시격인 경우에는 66원이다. 경량전 철의 노선 당 열차추진에 필요한 전기료가 년 간 20억으로 가정하면 년 간 1.32억원의 회생 에너지를 절약할 수 있다.

가용회생에너지 미사용율

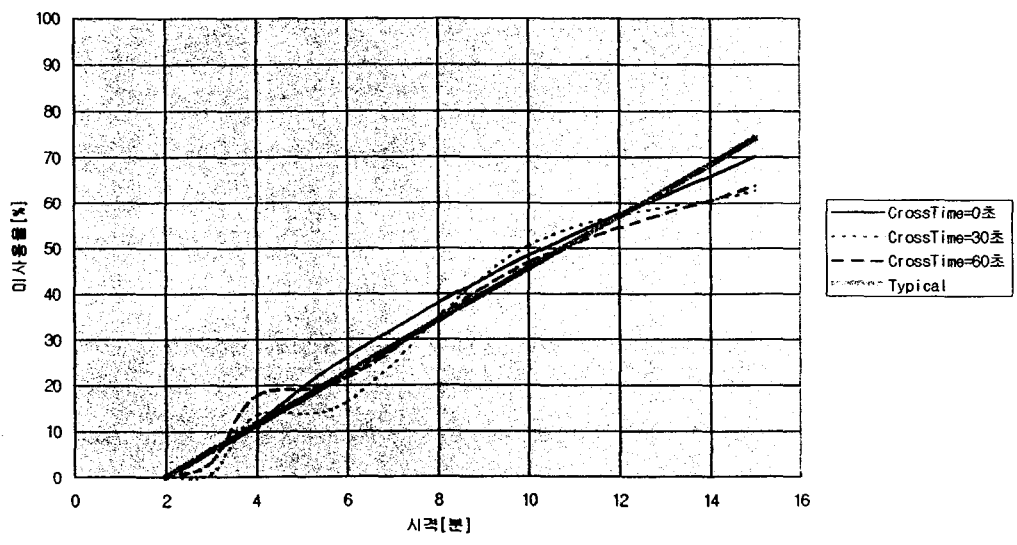


그림 4 편성당 회생에너지 미사용율

도표 5 시스템 회생에너지 활용 분석

시격 [분]	변전소공급 [kwh]	총회생 [kwh]	미사용 [kwh]	공급대비 미사용[%]	회생대비 미사용[%]
3	1157.9	296.8	16.1	1.4	5.4
4	878.1	222.6	26.4	3.0	11.9
6	596.5	148.4	39.1	6.6	26.3
10	376.4	89.0	43.1	11.5	48.4
15	264.3	59.3	41.7	15.8	70.3
20	202.2	44.5	34.4	17.0	77.3

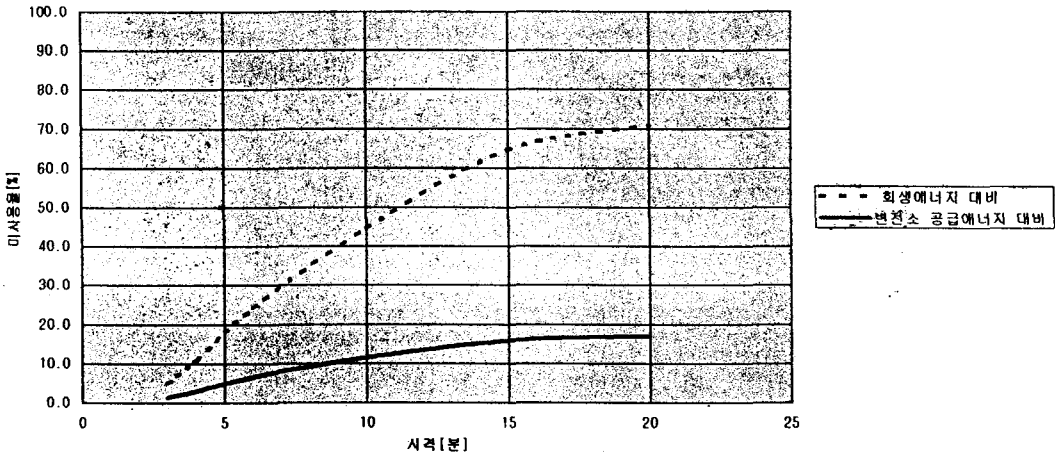


그림 5 시스템 회생에너지 미 사용율, CrossTime=0초

### 3. 결론

위와 같은 분석 방법을 통하여 DC 전기철도의 급전변전소에서의 잉여회생전력을 위한 인버터 설비 혹은 저항기의 설치 여부에 대한 경제성 검토가 수행될 수 있다. 본문의 분석에 의하면 경량전철 급전시스템에는 잉여회생전력의 소모를 저항기를 설치하는 것이 타당하다고 판단되며 나아가서 잉여회생전력을 활용할 수 있는 인버터 설치도 경제성 있다고 판단된다. 다만 인버터 설치에는 경제성 외에 유해전자파 및 고조파 문제가 있으므로 기술적 검토 혹은 개발이 병행되어야 한다.

### 참고문헌

- [1] 건설교통부, “경량전철시스템 기술개발사업 1차년도 연구결과보고서(분야:종합시스템엔지니어링), 1999.