

도시철도 변전소 회생전력 분석에 관한 연구

Analysis of regenerative power substations, railway

- 서울도시철도 전력공급소 전력분석을 중심으로 -

이준상†
Jun-Sang Lee

박종현*
Jong-Hun Park

서석철*
Suk-Chul Seo

김진영*
Jin-Young Kim

김기춘*
Gi-Chun Kim

ABSTRACT

An Electric railway system has the characteristics. The train powered by substations generates regenerative power when it runs on railway of various slope. A regenerative braking is an ideal system on account of reducing mechanical braking as well as recycling the energy.

In this study, Seoul Metropolitan Rapid Transit (substation) Precision analysis of the power of the electric car was carried out. Through this use of power substations, power supplies and trains through the regenerative power of the data analysis was performed utilizing research-based work.

국문요약

도시철도의 전동차는 변전설비로부터 전력을 공급받아 지상, 지하부의 다양한 선로조건(구배)을 지닌 선로를 운행하며, 열차 제동 시 많은 회생전력이 발생하고 있다. 회생제동은 에너지를 재활용 할 뿐만 아니라 기계식 브레이크의 사용을 줄이는 매우 이상적인 시스템이라고 할 수 있다. 또한 중요한 점은 회생제동이 가능한 시스템은 발생된 에너지가 어떤 정해진 흐름을 가지고 소모되고 재활용 가능하다는 것이다.

본 연구에서는 서울도시철도 전력공급소(변전소)의 전동차용 전력의 정밀분석을 실시하였다. 이를 통하여 변전소 전력공급과 전동차 전력사용의 데이터 분석을 통하여 회생전력 활용 연구의 기반작업을 수행하였다.

† 교신저자, 서울도시철도공사 기술연구팀
E-mail : junsang@smrt.co.kr

* 서울도시철도공사 기술본부장
* 서울도시철도공사 기술연구소장
* 서울도시철도공사 기술연구소 차장
* 서울도시철도공사 사장

1. 서론

1.1 연구배경

고유가 시대를 맞이하여 에너지이용효율화는 녹색정책과 맞물려 철도분야의 지상과제로 부상하였다.

철도선진국인 일본의 경우에는 최근 2011년 3월 11일 대지진 직후 심각한 전력부족을 겪었으며, 당시 도쿄시에는 대중교통인 철도의 계획정전 정책을 실시하였다. 이는 전력의 공급이 대중교통에도 중단 될 수 있음을 보여주는 것이며, 한국의 경우에도 예외는 아니라는 징후가 하계 전력예비율을 통해 보여 주고 있다.

전기철도분야 회생전력 활용의 배경 및 최근 동향으로는 회생실효의 대책 수립과 에너지 절감, 온실가스 감축, 전력 저장매체의 발전을 활용한 회생에너지용 지상, 차상 저장장치의 보급으로 이어지고 있는 경향을 보이고 있다.

일본의 경우 국토교통성 철도국 소관의 보조금 사업이 2009년부터 시작되어 해당 사업비의 1/3이내에서 보조금사업이 진행되고 있으며, 국내에도 국가 R&D사업으로 지상설비(변전소) 설치 및 지역절약 에너지사업으로 연구 및 사업이 추진 되었다. 또한 각 지자체 및 철도운영기관에서는 에너지저장시스템의 구축을 추진 중에 있으며, 신규 건설되는 전력공급소에는 설계에 반영되어 기반시설의 건설이 진행 중에 있다.

전기철도분야 회생전력의 적극적인 활용은 에너지 이용효율의 확대와 더불어 가선전압의 안정화로 원활한 전력공급에 기여할 것이며, 전동차의 제동력 확보로 승강장 스크린도어 설치 후 전동차 정밀정차에도 기여할 것이다.

1.2 연구목적

본 연구에서는 도시철도 급전시스템의 구성과 전력공급소 선정과 연계하여 회생전력저장장치 설치 위치별 장단점을 분석하고, 도시철도 기반설비인 전력공급소의 전동차용 전력공급반 정밀전력 분석을 기반으로 무부하 가선전압 대비 전압의 상승 및 하강을 계측 분석, 각 피더별 전력조류를 분석하고자 한다. 이는 회생전력 저장시스템 구동의 기초자료로 활용 될 것이며, 저장시스템 설치 후 데이터의 비교로 추후 경제성을 평가 자료로 활용될 것이다.

2. 본론

2.1 도시철도 급전시스템

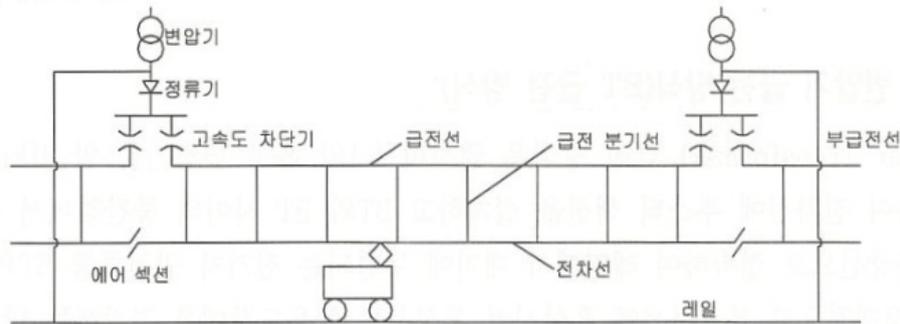
전기철도에서의 전기의 공급은 발전소로부터 변압기로 승압하여 송전선에 의해 도시철도

변전소에 3상 교류로 송전 된다. 도시철도 변전소에서는 이를 다시 전동차에 전기를 보낼 수 있도록 전압을 강하하여, 이것을 정류기를 사용하여 직류전력으로 공급하게 된다.

한국전력공사에서 교류 22.9kV 특고압 전기를 받아 변전소에서 직류 1500V 인 전동차용과 교류 6.6kV 의 고압전기로 변환하여, 전동차용은 전차선로에 공급하고 교류 6.6kV 고압전기는 각 역사의 전기실에 공급하여 380V와 220V로 변환하여 도시철도 모든 설비에 공급하도록 구성되어 있다.

전차선의 표준전압은 DC1500V 로 본선의 전차선은 전압강하와 사고 발생시 정전구간을 짧게 할 수 있도록 상, 하선 공히 변전소를 기준으로 구분하고 급전방식은 병렬급전 방식으로 건설되었다. 또한 급전선의 용량결정은 8량(4M4T) 편성으로 운전시격은 2분으로 전류용량을 기준으로 설계 되어 있다.

전차선의 급전방식은 도시철도 변전소에서 전차선로로 전력을 공급해주는 방법으로 상, 하행선 분리방법을 선택하였으며 이는 도시철도 열차운전구간 사고 발생 시 정상 선로의 연속운전이 가능하며 고장선로 확인 시 신뢰도가 높은 방식이다.



2.2 도시철도 변전소 위치 선정

변전소 설비는 원칙적으로 부하 중심에서 가장 가까운 곳에 설치하는 것이 이상적이다. 이는 전력손실, 전압강하 및 선로 배선이 적어지기 때문이며, 따라서 변전소의 위치는 사람의 출입이 빈번하지 않고 보안이 유지될 수 있는 장소를 선정하여 설계 시 반영하게 된다.

주요검토 사항으로는

- 균등한 급전거리를 설정하여 전차선 전압 분포의 안정성 도모
- 각 변전소의 균등부하 배분에 따른 기기 용량 표준화
- 수전 선로에서의 수전 선로 루트 단축

도시철도 급전용 변전소는 시뮬레이션 결과에 따른 변전소 위치를 토대로 한전변전소와의 거리, 변전소 용량, 역간거리, 전압강하, 전압 변동을 등 중요사항을 고려하여 효율적이고 안전한 도시철도 운용이 될 수 있도록 변전소 위치를 선정 하게 된다. 또한 이 모든 것을 경제적인 측면에서 충분히 검토하여 결정하게 된다.

2.3 회생전력 저장시스템 설치위치 장·단점 비교

2.3.1 차상설치

- 개요 : 전동차의 회생 제동 시 발생하는 회생전력을 전동차에 장착된 에너지 저장장치에 저장함으로써 회생제동의 극대화 및 에너지 재활용이 가능하게 된다.
- 장점 : 회생제동에 의한 에너지의 활용이 가능할 뿐만 아니라 가선거리에 상관없이 차량탑재 에너지 저장 소자에 축적하면서 제동력을 극대화 할 수 있다.
또한 시스템의 구성에 따라 현재 상태에서의 가선의 변경과 추가 공사를 행하지 않고, 선로 저항 및 주행저항에 영향 없이 운동에너지를 전기에너지로 활용이 가능하게 된다.
- 단점 : 현재 도시철도 시스템(중전철)의 경우 발생하는 회생에너지 전체를 차량에 탑재한 에너지 저장장치에 회수하기 위해서는 3~5 [ton] 정도의 에너지 저장장치가 추가적으로 고려되어야 한다. 또한 전체 전동차 편성(서울도시철도공사 전동차 200편성)에 설치를 가정할 경우, 전체 변전소(53개) 대비 약 4배의 설치 수량이 필요하게 된다. 추가로 차량에 탑재 시 주행 중 발생하는 진동, 소음, 먼지(щет가루)등의 환경요인도 고려해야 한다.

2.3.2 정거장 설치

- 개요 : 정거장 진입 시 회생제동 에너지를 저장하여 출발 시 역행전력으로 재활용 함으로 회생에너지의 최대 활용이 목적.
- 장점 : 전차선로의 회생에너지 수용성 확보(회생실효 대책) 방안으로 유리하며, 회생 전력 발생 부근(최대 회생에너지 발생위치) 설치가능한 점이 있다.
또한 변전소 설치에 비해 작은 용량의 설계가 가능하게 됨.
- 단점 : 회생전력 발생(전차선로)과 저장매체까지의 설비(선로)가 구축되어야 하며 전력감시설비의 추가를 고려하여야 한다. 또한 전동차와 정거장 사이에 설치된 저장장치와의 거리가 길면 선로저항으로 인한 손실에 대한 사전고려가 요구 되며, 서울도시철도 148개 역 대비 약 140개소의 설치개소가 필요하게 됨.

2.3.3 변전소 설치

- 개요 : 회생전력의 재활용과 전차선 전압 안정화 및 역사 일반전원으로 재활용 등에 목적이 있다.
- 장점 : 도시철도 급전 시스템(병렬급전), 전차선 급전시스템과의 연계와 기존 보호계통 시스템과의 연동 문제도 해결이 가능하게 된다. 또한 가선전압의 상승 및 하강의 억제를 통하여 전력계통의 안정화를 가져올 수 있다.
급전선의 포설이 정거장 시, 중점부에 되어 있어 회생에너지 저장 및 활용에도

장점을 가지고 있다.

- 단점 : 회생 전동차와 변전소에 설치된 에너지 저장시스템과의 거리가 길면 가선선로의 임피던스 성분으로 인해 손실이 발생되며, 에너지저장매체의 용량이 증대되어야 하기 때문에 개발비용의 증대요인이 생기게 됨.

<총괄 비교표>

	차상설치	역간 설치	변전소 설치
장점	1. 에너지 활용률 大 2. 회생제동력 극대화 (선로손실 小) 3. 시설분야 공사 불필요	1. 에너지 활용률 大 2. 단위 설계용량 小 3. 회생에너지 수용성 大	1. 급전시스템 연계 가능 2. 가선시설 추가 없음 3. 변전 보호시스템 연계방안 우수 4. 설치수량 小
단점	1. 전동차 중량 증가 (전력사용량도 동시증가) 2. 설치수량 증가(약4배)	1. 가선시설 추가설치 2. 시스템 감시장비 추가 3. 설치수량 증가 (약 3배)	1. 단위 설계용량 大 2. 단위 설치비용 大 3. 거리대비 선로손실 발생
경제성	에너지 이용효율 大 단위 설치비용 大 전체 설치비용 大	에너지 이용효율 大 단위 설치비용 中 전체 설치비용 大	에너지 이용효율 中 단위 설치비용 大 전체 설치비용 中
기술발전	저장매체 경량화 요망 단위설비 콤팩트화	전차선 설비 연계 기술 급전시스템 보호 및 감시 설비기술 확보	에너지 이용효율 증대방안 선로손실 저감 방안 연구
공통사항	전동차 제동 및 역행에너지와 저장시스템 연계효율 극대화 기술발전 필수 전동차 운행 특성과 관련 저장매체의 급속 충·방전 기술 발전 기존 전동차 전력 급전 시스템과의 연계 안정성 확보		

2.4 전력공급소 전동차 급전전력 분석

2.4.1 전차선 가선전압 및 전류 분석, 회생전력발생 횟수

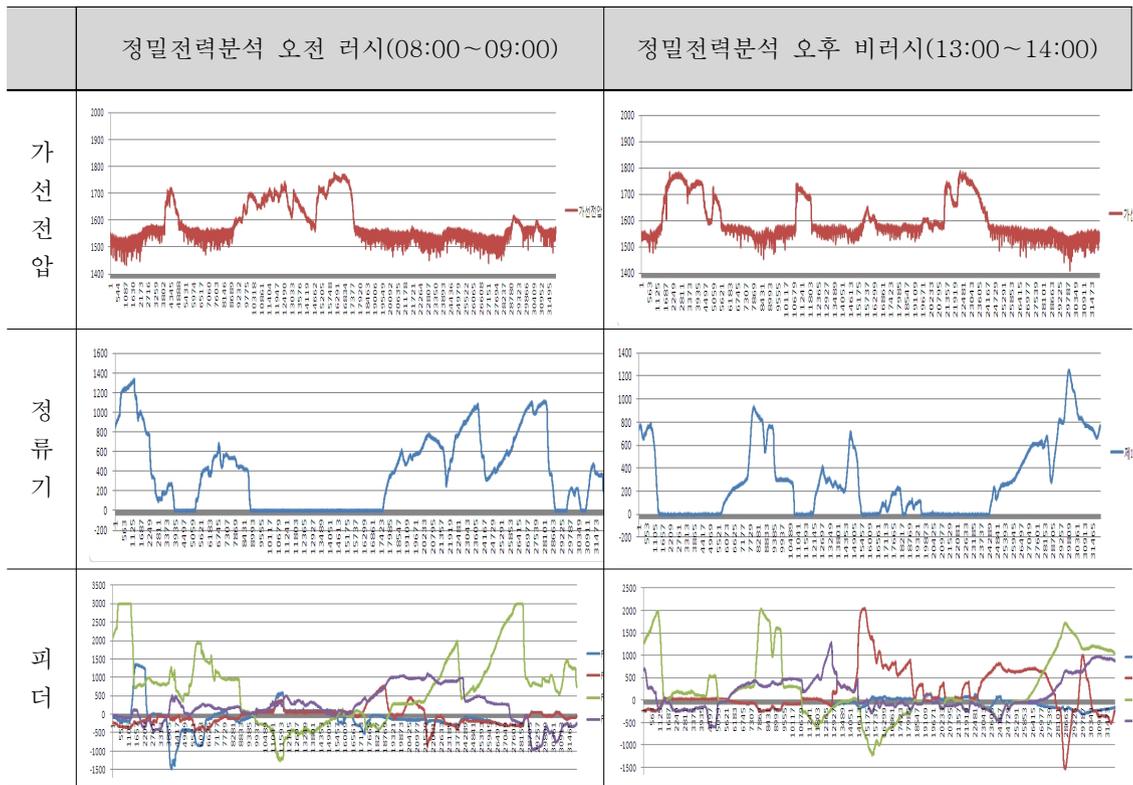
직류인 전력공급소 전차선 가선전압은 무부하전압 1593V의 급전을 시작으로 러시아워인 08:00~09:00의 전압변동은 최대 1781V, 최저 1409V 까지 계측되었다. 또한 비러시아워인 13:00~14:00의 가선전압의 변동은 최대 1822V, 최저 1409V로 계측되었다.

오전 러시 전차선 전류 [A]	
Feeder 11	-2070~1961
Feeder 12	-882~2555
Feeder 13	-2266~2997
Feeder 14	-2013~1941

오후 비러시 전차선 전류 [A]	
Feeder 11	-1433~1655
Feeder 12	-1528~2433
Feeder 13	-1588~2502
Feeder 14	-1271~2534

전차선 피더별 가선전류의 변화는 위표와 같은 변화를 보이고 있으며, 일일 급전시간 동안의 전압상승횟수는 평균 2100회로, 1~5초(1090회), 5~10초(451회), 10~20초(392회), 20초 이상(164회)로 계측되었다.

〈정밀전력분석 그래프〉



2.5 전력공급소 회생전력량

변전소 정류기 공급전력 대비 회생전력 활용량은 최저 3.4%에서 최대 27%까지의 변화를 보이고 있다. 이는 회생전력의 발생원(제동 전동차)과 활용원(역행 전동차)의 불일치로 계측되는 것으로 보이고 있으며, 원인은 시격에 따른 제동 전동차와 역행 전동차의 거리차와 시간적인 불일치가 원인이 되고 있다.

도시철도 전동차의 에너지 사용 및 발생은 다음과 같다.

전동차는 역행(기동)하기 위하여 공급받은 에너지의 45%~47%를 제동 시 회생하고 있으며, 이중 최저 3.4%에서 최대 27%까지 가선 안에서 재활용 되고 있다. 나머지 20% 이상의 에너지는 전동차 저항설비(OVR)와 기타 부하로 소모 되고 있다.

회생전력의 적극적인 활용은 에너지의 재활용 뿐만 아니라, 전차선 가선전압의 안정화에 따른 도시철도 전력계통의 안정화를 가져올 것이며, 전동차 저항설비의 동작조건을 줄여 터널내 환경개선과 전동차 제동력 확보로 정거장 정위치 정차에 기여할 것이다.

3. 결론

본 연구에서는 서울도시철도공사의 7호선 수락산 변전소를 대상으로 가선전압 및 정류기(1,2,3호계), 전동차용 급전반(F11~F14) 까지 총 8개 개소의 정밀 데이터를 추출하였다. 상기 데이터를 토대로 에너지 저장시스템 구동의 기초자료로 활용될 것이며, 회생전력저장장치의 설치 전, 후의 데이터의 비교를 통한 경제성 평가의 자료로도 활용 될 것이다. 또한 전동차의 에너지 사용 및 회생전력 발생, OVR 동작의 계측 부분은 더욱 연구가 필요할 것이다.

도시철도 시스템은 회생전력을 재활용 하기위한 기반 기술을 토대로 건설 되었으며, 적극적인 에너지 재활용 기술의 도입으로 도시철도분야 ‘에너지 이용효율 증대’ 라는 목표를 달성할 수 있을 것이다.

참고문헌

1. “도시철도 전력시스템 표준화 연구” 2007. 6 도시철도표준화연구개발사업 최종보고서, 건설교통부, 한국건설교통기술평가원, 한국철도기술연구원
2. “차세대 전철시스템 에너지회생장치 개발“ 2008. 5.31 미래철도기술개발사업 제5차년도 최종보고서, 한국철도기술연구원, (주)시엔에이전기, 성균관대학교
3. “도시철도에너지 사용설비진단용역 보고서” 2003. 4 서울특별시지하철건설본부