

전력회생 브레이크의 에너지 효율화 방안 연구

A study on the way on energy efficiency of regenerative braking

박영진+
Young-Jin Park

문관일*
Kwan-Il Moon

신민식*
Min-Sik Shin

손영진**
Young-Jin Son

Abstract

Currents which are generated at both ends of drive motor by operating brake pedal when subway train is driving, will generate the revitalization actual effect if they are not used immediately. So there exist rolling stock established Dynamic braking annex for the purpose of stable brake performance in case there are no retrogress train around or no stable wiring voltage. Therefore 55% of entered energy are consumed in subway train. 45% are used in down gradient section or for regeneration energy and among them 25% are used for another train's retrogression through the wiring. So to reduce revitalization method keeping the existing system, substation's service voltage should be declined about 5%. And then it will ease off excessive wiring voltage rise. And there need energy reduction by flexible service voltage adjustment and study for energy consumption efficiency in the subway.

국문요약

전동차가 주행중에 브레이크 페달의 작동으로 주행모터의 양단에 발전된 전류는 전기에너지 특성상 바로 소비되지 않으면 제동력이 발생하지 않는 현상(회생 실효)가 발생하기 때문에 주변에 역행차량이 없거나 가선 전압이 안정되지 않는 경우 안정된 제동성능을 확보할 목적으로 발전제동을 병설한 차량이 존재하고 있다. 그래서 입력된 에너지의 55%를 전동차에서 소비하고 하구배 구간이나 회생 제동시 45%의 입력에너지 사용되며 그중 25%는 가선을 통해 다른차의 역행을 사용되므로 기존의 시스템을 크게 벗어나지 않고 회생 수단, 회생 실효를 줄이기 위해서는 변전소의 배출전압저하(5%)정도 하여 회생시 지나친 가선 전압 상승을 완화시킬 수 있다. 실제로 1호선 직류구간에 혼잡시간때 한구간에 상선기준으로 3대의 전동차가 운행되어 1500V의 전압측정과 비혼잡시간에는 1대~2대의 전동차정도 운행으로 1700~1800V 측정되므로 5%정도 조정은 운행에 지장을 초래하지 않을것으로 사료된다. 적정전압 측정 데이터를 통한 탄력적인 배출전압 조정을 통해 지하철 또한 에너지 소비효율을 위한 연구가 필요하다고 본다.

+ 책임저자 : 비회원 : 서울산업대 철도차량공학과 학생, 서울메트로
E-mail : rama777@dreamwiz.com
TEL : 017-201-6544 FAX : (02)6110-1212
* 비회원 : 서울산업대학교, 철도차량공학과, 학생
* 비회원 : 서울산업대학교, 철도차량공학과, 학생
* 정회원 : 서울산업대학교, 자동차공학과, 철도차량공학과 교수

1. 서론

서울지하철 1호선이 1974년에 서울역~청량리역 사이 운행을 시작으로 전기철도로서 도시철도시대를 열었다. 36년이 지난 지금은 공공 교통으로서 도심의 교통난 해소와 환경오염 방지를 위해 지방의 중소 도시에서도 도시철인 지하철, 저비용의 건설비가 투입되는 경전철 및 자기부상 열차 등의 다양한 신 교통 모델이 지속적으로 추진되고 있다. 그러나 타교통보다 환경오염을 하지 않고 수송력이 높다는 장점으로 에너지 소비에 대해 대책 없이 사용한 결과 서울시 공공부문의 전력 소비가 전체 에너지 소비의 40%이상 증가하는데 주도적인 역할을 하게 되었다. 반면 선진도시인 도쿄, 런던, 뉴욕 등은 온실가스 감축을 위해 공공기관의 에너지 절약을 강력히 추진하고 있고, 철도의 수송량 당 에너지 소비 또한 타 교통에 가까워지고 있다는 지적에 의해 大電力을 소비하는 공공 교통인 지하철의 에너지 소비 효율성 향상을 위해, 전동차의 회생제동을 저장하는 전기저장 설비 도입을 포함한 전력 회생 브레이크의 폭 넓은 이용과 경량 소재를 이용한 차량 경량화 등을 추진하고 있다.

현재 철도 노선의 약 56(%)가 전철화 되었으며, 2020년경에는 약 86(%)의 전철화를 계획하고 있어 여객수송의 대부분을 차지하게 되므로 승객 서비스 차원의 승객의 승차감 향상을 위해 전기 철도차량의 안정적인 운행을 위해 충분하고 안정된 전력이 공급되어야 하지만, 전기 철도는 변동성 大電力 부하의 특성을 갖고 때문에 어려운 실정이다. 운행 중인 차량은 입력된 전력 에너지의 55[%]를 전동차에서 소비하고 회생 제동 시 45(%)의 입력에너지가 사용되며, 그 중 25(%)정도는 가선을 통해 다른 차의 역행에 사용되므로, 전동차에서 발생하는 회생전력을 이용하면 전동차에 소비되는 전력량 감소와, 회생전력 흡수율의 증가를 통해 기계 제동의 사용빈도 감소와 정위치 정차를 통해 승차감 향상과 스크린 도어와 연계동작에 이바지 할 수 있다.

본 논문에서 직류 급전계통을 운행하는 지하철을 통해 회생 에너지 발생과 이용방법, 영향을 알아보고, 변전소 출력 전압 감소를 통한 회생전력 효율화 방법을 연구하고자 한다.

2. 회생 제동의 이해

발전제동을 사용하는 저항 차는 전동기를 제어하기 위하여 관성을 원동력으로 하여 발전기로 동작 시켜 발전된 전력을 외부의 저항에서 주울 열로 소비시키는 방식이다. 직류 직권 전동기로 전기 차의 견인 전동기로 사용하여 기동 시 큰 토크를 얻고 고속 운행 시 전력 부하를 적게 할 수 있으므로 단자 전압과 전류를 제어하여 쉽게 속도를 제어 할 수 있다. 또한 제동 시에는 주 전동기를 발전기로 하여 발생된 전기에너지를 저항기에서 열로 발산 시키는 발전제동 법으로 차량을 정지시킨다. 그러나 대차의 저항이 있는 차량은 출입문 개방 시 대차의 열이 실내로 유입되어 실내온도에 따른 빈번한 민원 제기와 廢熱量 증가로 터널내 온도상승은 여름철 냉방비 증가와 터널내의 고온화를 초래하고 있다.

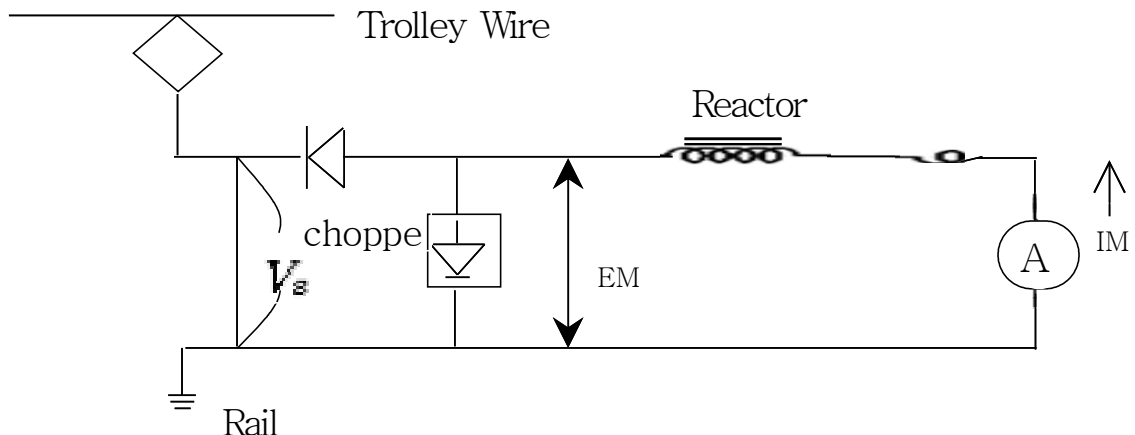


그림1. 전기차 초퍼제어차량의 회생제동 회로

80년 이후 도입된 Chopper(현대) 회생제동은 교차계자 방식으로 1군(M1~M8)의 균형 발전을 위하여 전기 차 발전전류는 상대계자에 공급되어 자속을 발생시켜 운전자 BV Step $\times 0.5$ 에 해당하는 감속도가 실현되는 발전전류 요구치에 의하여 Chopper 회생제어가 시작된다. 이후 전동차 속도가 감소되어 12Km/h 이하가 되면 Chopper 제어를 급하여 회생제동을 종료한다. 회생 전류치의 부족분은 공기제동으로 보충되고, 가선으로 회생은 Thyristor Off시간에 행하여 전기 차 발전전류와 MSL 축척에너지가 합산되어 Diode를 통하여 가선으로 회생된다.

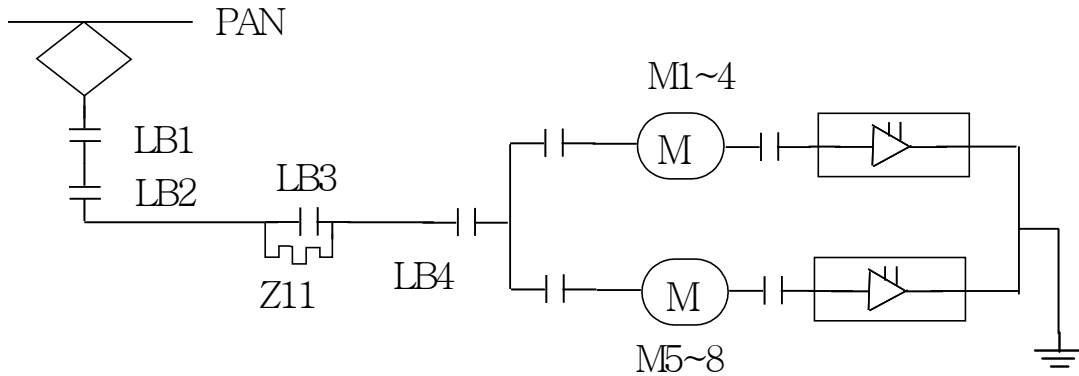


그림2. 초퍼(대우) 차량의 회생제동 구성도

Chopper(대우)는 전기자와 계자의 병렬 회생회로(D21,22), 과전류 방지용(MOTOR 보호용)으로 고속 회생제동 시 전기자 전류가 계자 전류보다 크고 전기자 전압이 가선 전압보다 클 때 도통하여 전기자에서 직접 가선으로 회생시키고, 전기자와 계자의 직렬 회생회로(D11,12)는 회생제동 중 가선으로의 회생은 Chopper 동작 주기 중 T1 Thyristor의 Off시간에 행하여 전기 차 발전전류와 MSL 축척에너지가 합산되어 D11,12 Diode를 통해 가선으로 회생한다.

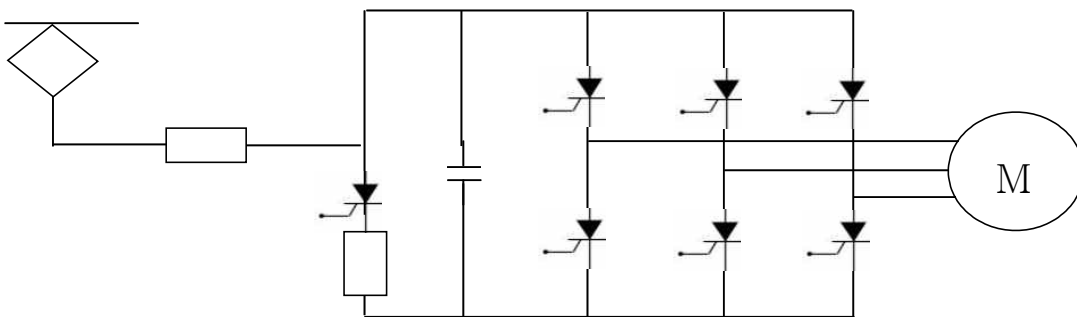
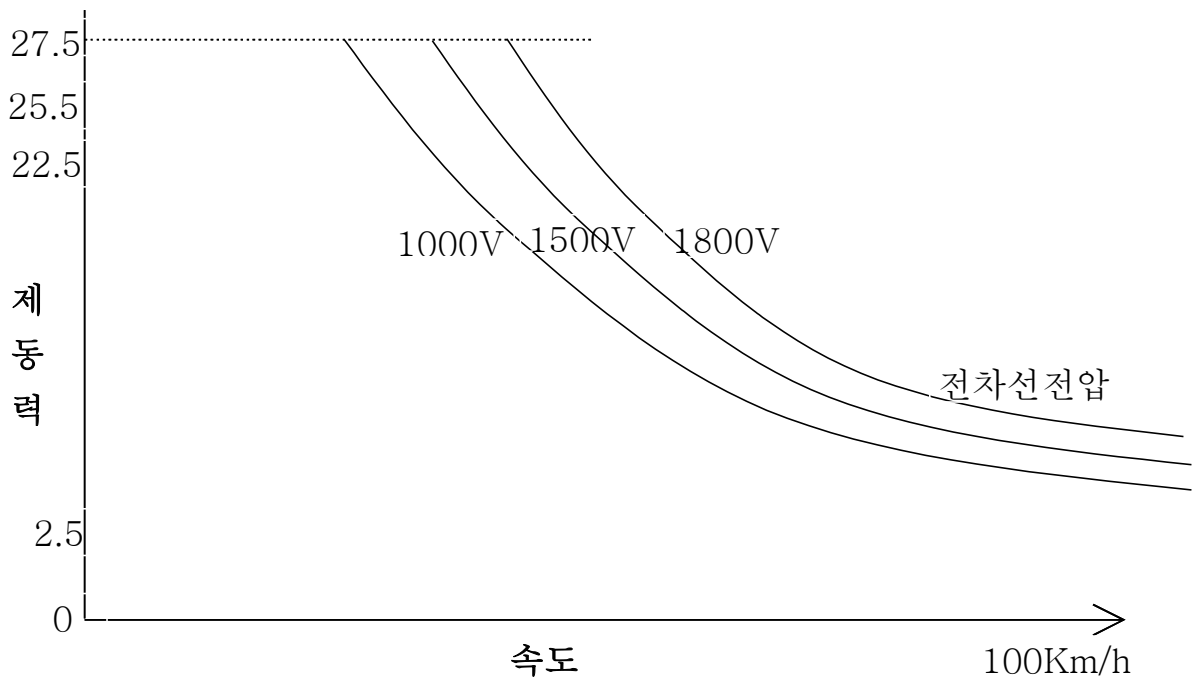
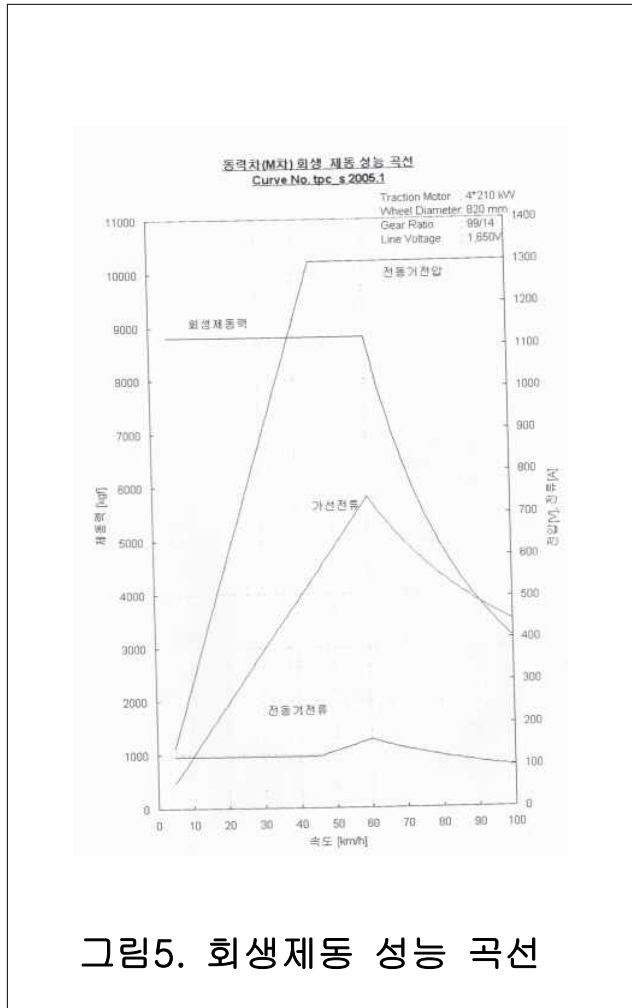
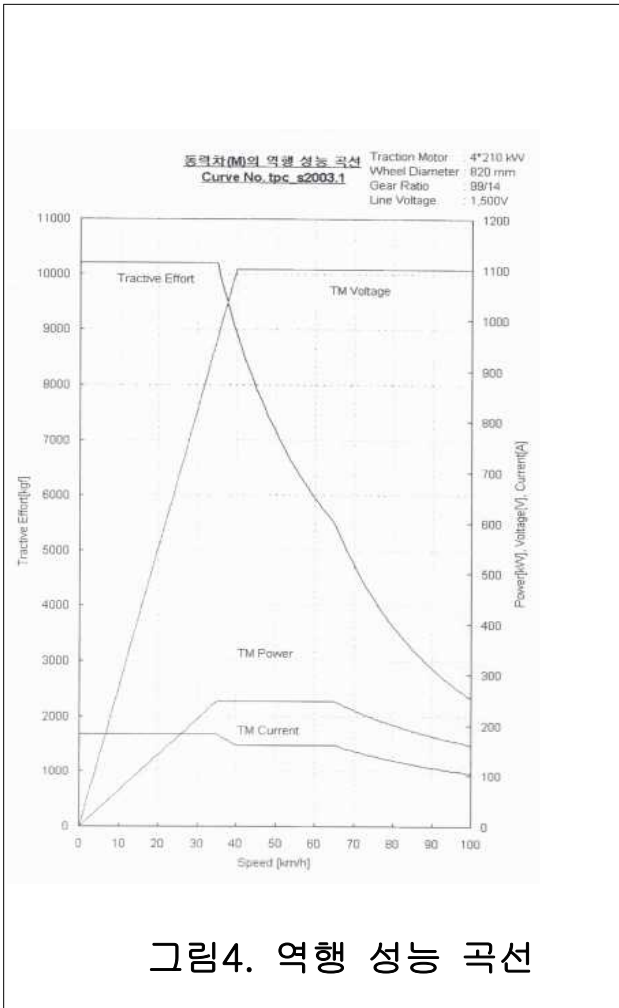


그림3. PWM 제어차량 회생제동 구성도

VVVF(Variable Voltage Variable Frequency)는 Inverter에 의한 모드로 주 전동기의 회전자가 회력(차륜)으로 회전되고 있는 상태(타행운전)일 때, 유도 전동기의 계자코일에 동기속도 이하의 회전 계자를 만들면, 슬립은 마이너스가 되고, 회전자 발생전류 방향, 기자력 회전력이 역행과 반대가 되어 회생된 전력은 Inverter를 통해 전원 측에 반환된다.

3. 역행, 회생 제동곡선(메트로 2호선 VVVF)

전류가 큰 직류가선에서의 회생 전압으로 인한 가선 전압 상승은 정류기 및 전동차에 설치된 전력 변환장치에 문제를 발생시키고 900V이하로 떨어지면 제동력 발생하지 않고 제동 중 전차선 전압이 기준전압(1750V)가 넘으면 속도와 무관하게 회생제동이 소멸되어 공기 제동 투입시키는 비정상적인 상황이 발생되어 적절한 크로스 브랜딩(Cross-Blending)이 이루어지지 않고 회생제동 Fade 지연시간이 늘어 차량의 감속에 영향을 미쳐 승차감 및 정위치 정차에 영향을 미치게 되고, 인접차량의 역행정지로 인한 회생실효는 ΔI 형 고장선택장치의 불요동작을 발생시킬 수 있다.



3. 회생제동의 활용

플라이휠 방식(Fly Wheel)과 초전도 에너지 저장시스템(SMES: Superconducting Magnetic Energy Storage), 슈퍼커패시터(EDLC: Electric Double Layer Capacitor)방식의 에너지 저장장치가 있다.

플라이휠 에너지 저장시스템은 입력되는 잉여 전기 에너지를 플라이휠의 관성을 이용, 회전운동에너지를 변환하여 저장하고 필요시 전기 에너지로 순시에 출력하는 장치로 Battery와 같은 화학적 에너지 저장시스템에 대비되는 기계적 에너지 저장방식(Electric - mechanical battery)이며 고효율, 장수명, 무공해의 청정에너지 저장장치여서 미국, 독일을 중심으로 단점인 대중량, 부피에 대한 개선을 위해 개발 중이다. 초전도 에너지 저장시스템(SMES)은 초전도 마그네트에 전류를 흘려 발생하는 자기에너지로 전력을 저장하는 새로운 개념의 전력 저장 방식이며, 유효, 무효 전력을 각각 제어할 수 있고, 친환경적 이어서 많은 곳에 적용되고 있고, 특히 미국에서는 에너지 저장용 콘덴서의 자체 인덕턴스를 최소화시키는 기술을 통해 기존의 UPS가 갖고 있는 단점을 개선한 Micro - SMES을 적용하고 있다. 슈퍼커패시터(EDLC)는 2차 전지와 비교해서 100배 이상의 고출력 특성을 갖고 있으며, 전극과 전해질 계면으로의 이온의 단순한 이동을 이용하여 저장하는 장치로서 큰 용량성과 속응성이 장점이고 반영구적이며 극성이 바뀌어도 영향을 받지 않는 특성이 있다.

회생 인버터 장치는 회생열차의 회생제동에서 발생하는 회생 잉여에너지를 정류기와 역방향인 Thyristor를 이용하여 전원 측의 위상과 동일하게 하여 직류단락이 되지 않도록 제어하며, 전력을 차량으로부터 전원 측으로 이동하는 것이 가능하며, 인버터에서 교류로 변환하여 변전소의 교류 전력 공급 계통(22.9[KV])로 역 송전하여 회생에너지를 소비하는 장치로서 회생실효가 발생하지 않아 정위치 정차가 가능하고, 차량을 경량화 할수 있다.

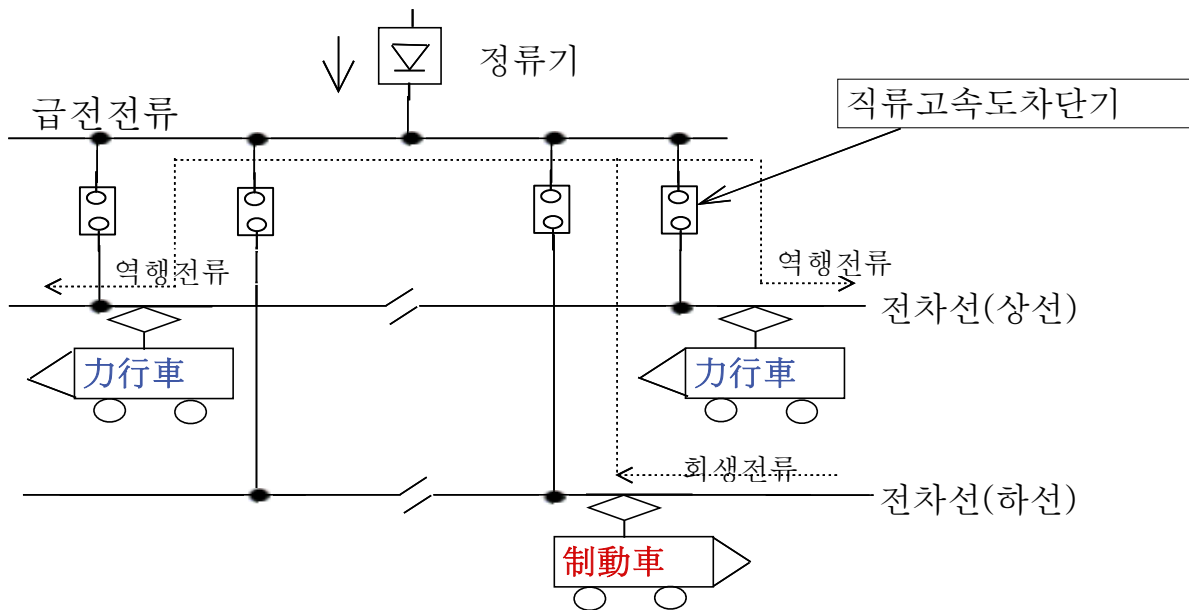


그림1. 회생전류의 흐름도

외국과 비교해서 가선전압이 높은 국내에 에너지 저장장치 도입을 위해서는 전압, 전류 정격상승으로 인한 에너지 저장장치 용량, 전력 변환장치 용량 등을 검토해야하고, 설치 시에는 회생전력을 인근 차량에 의해 대부분 소모가 가능한 구간이나 구배 또는 회전 반경에 의한 조건으로 회생전력이 적게 발생하는 구간은 배제 되어야 한다.

4. 가선 전압 조정을 통한 에너지 효율 방안검토

가. DC 1500V 공칭 가선 전압 산정 식

전철 변전소에 실리콘 정류기는 입력을 교류로 받아 출력을 직류로 내보내므로, 직류단자 전압은 맥동 전압의 평균치를 나타낸다. 출력전압 V_{dc} 는

$$V_{dc} = \frac{3}{\pi} \int_{\frac{\pi}{3}}^{\frac{2\pi}{3}} V_m \cos\theta d\theta \quad (5-1)$$

$$= \frac{3}{\pi} V_m = 0.9549V_m \text{의 관계가 성립한다.}$$

교류 전압의 실효치 V 는 최대전압 V_m 에 대하여 $V_m = \sqrt{2}V$ 의 관계를 가지므로,

$$V_{dc} = 0.9549 \times \sqrt{2}V = 1.35V \text{의 관계가 성립된다.} \quad (5-2)$$

즉, 3상 전파 정류기의 직류 전압은 교류 전압의 실효치에 비하여 1.35배가 되므로, 정류기에서 직류전압을 1500[V]로 하기 위하여 교류전압은 식 (5-2)에 의해 1111[V]가 인가되어야 하나, 정류기의 1500[V]출력은 전 부하(Full load)가 걸릴 때이므로 무 부하(No load)시는 전압 강하 등을 고려해 1200[V]를 인가하여 $E_d = 1.35 \times 1200V = 1620[V]$ 가 무 부하 전압으로 출력되도록 설정 되어 있다. 그러나, 보통 전압 강하 등을 고려하여 병렬 급전하는 직류 급전 변전소 간격이 4~10Km이나 변전소 급전 구간이 짧은 구간에도 1620V를 동일하게 적용하여 가선 전압이 높아 가선전압 상승에 따른 회생 불요동작이 발생하므로 변전소 정류기출력 전압의 3~5%정도 저감시켜보면

$$E_d = 1.35 \times 1164\sim 1140[V] = 1571\sim 1539[V] \text{가 된다.}$$

나. 1호선 메트로 전철변전소 급전구간, 운행차량, 가선 전압, 전류 현황

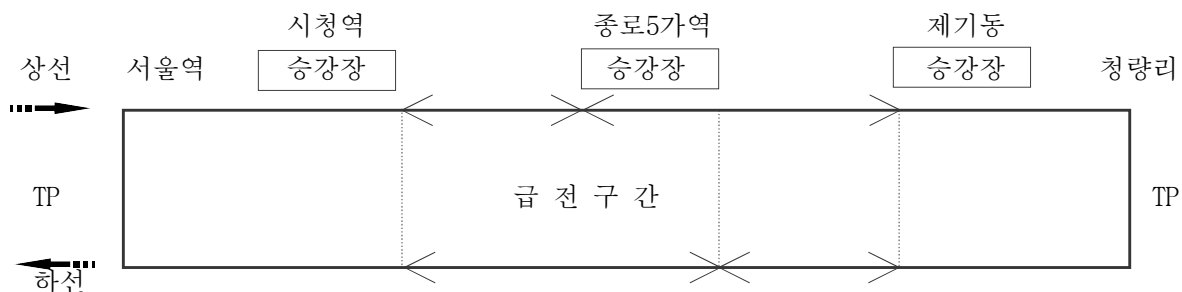


그림1. 1호선 전철 변전소 급전구간(약8.0Km)

도표1. 서울역~충량리역 시간대별 지하철 운행 차량

시간 (평일)	철도차량	메트로 차량	메트로 1호선 구간 운행 차량
오전RH(07시~08시)	20대(상선), 25대(하선)	2대(상선), 6대(하선)	13대
NH(12시~16시)	66대(상선), 65대(하선)	9대(상선), 8대(하선)	9대
오후RH(18시~20시)	31대(상선), 33대(하선)	7대(상선), 3대(하선)	8대

*평일 1호선 전 구간 총 운행 횟수585회(철도 488회, 메트로 97회)

표2. 시청 전철 변전소 시간대별 가선전압, 전류 측정표.(4월 22일 기준)

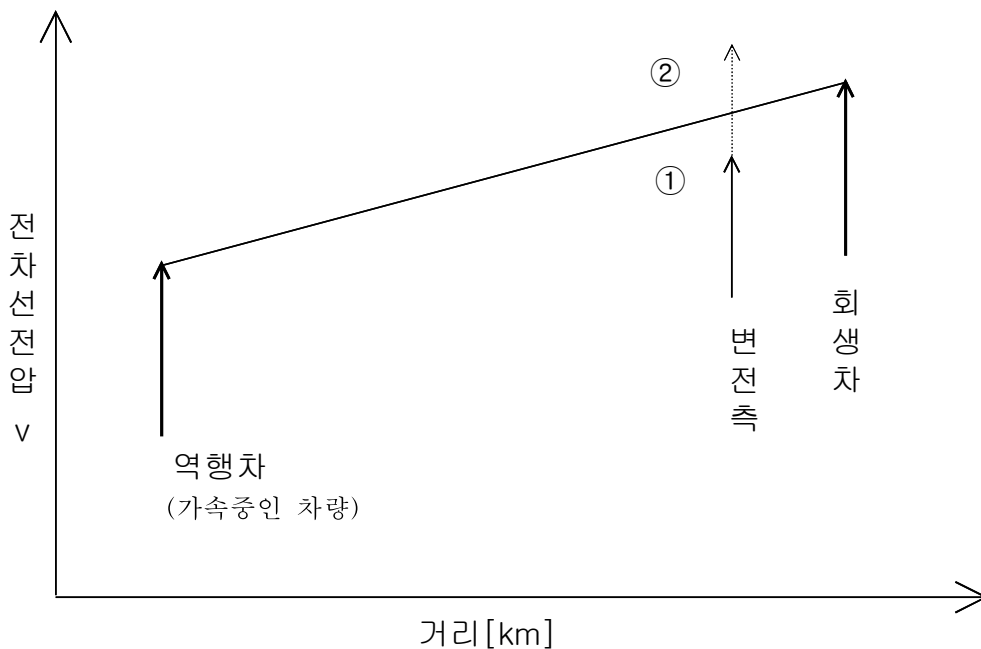
오전 Rush hour			Normal hour			오후 Rush hour		
시각 (T ₀)	가선전압 [V]	가선전류 [A]	시각 (T ₀)	가선전압 [V]	가선전류 [A]	시각 (T ₀)	가선전압 [V]	가선전류 [A]

07:44:13	1707	183	13:17:04	1738	-28	19:36:51	1665	815
07:44:33	1776	-119	13:17:24	1703	174	19:37:11	1685	174
07:44:53	1705	128	13:17:44	1728	37	19:37:31	1525	6723
07:45:13	1643	2043	13:18:04	1720	-0	19:37:51	1582	4434
07:45:33	1510	7796	13:18:24	1734	-92	19:38:11	1665	915
07:45:53	1623	.2895	13:18:44.	1659	1172	19:38:31	1687.	247
07:46:13	1665	3582	13:19:04.	1730	27	19:38:51	1665.	915
07:46:33	1711	91	13:19:24.	1669	751	19:39:11	1722.	9
07:46:53	1724	27	13:19:44	1711	64	19:39:31	1707	110
07:47:13	1667	760	13:19:04	1736	-37	19:39:51	1623	2995
07:47:33	1685	174	13:19:24	1709	64	19:40:11	1770	-92
07:47:53	1667	1108	13:19:44	1697	137	19:40:31	1778	-110
07:48:13	1649	1869	13:20:04	1655	1273	19:40:51	1722	37
07:48:23	1705	91	13:20:24	1643	1740	19:41:11	1647	1539

다. 타당성 검토

조사결과 개통 후 제대로 된 기기 업그레이드 가 되지 못해 1500/10mA로 아날로그 값을 디지털 값으로 바꿔주는 변전소 TD기기의 환산불량(고전압에 대해)으로 (-)값이 나왔음을 참고하길 바랍니다.

1호선 직류구간에 운행하는 철도, 메트로 차량 중 아직도 발전된 전류를 저항으로 태우는 저항 차(철도 28%, 지하철 25%)가 운행 중에 있어 회생전력이 많이 발생하지 않는다는 점을 고려하더라도 러시아워(Rush Hour)에는 시청 변전소 급전구간에 상, 하선 4~6대 차량 중 동시에 3~4대가 역행, 제동을 하는 집중부하로 가선전압은 낮고 전류 발생이 높고, 비 혼잡 시간대는 상, 하선 1~2대 운행으로 가선전압이 높고, 전류의 상승폭이 적음을 알 수 있고, 전체적으로 시간대별에 관계없이 가선 전압이 높음을 알 수 있어 변전소 배출전압을 약간(3~5%)정도 낮추어도 전동차 운행에 충분하며 가선전압이 1750[V]이상 되면 발생하는 회생실패 또한 줄 일수 있을 것이다. 또한, 회생 차에서 본 먼 열차부하와 회생 차와의 사이에 변전소가 있을 경우 변전소의 배출전압이 높으면 회생 차의 회생 전력이 미치기 어려울 수 있으므로,



②변전소에서의 거리와 전차선 전압

전철 변전소 배출전압이 ①이면 회생 차의 높은 전압이 전압특성(높은 곳에서 낮은 곳으로 이동)에 의해 역행차로 전류가 공급되는 전차선 전압 직선을 나타낸다. 전철 변전소 배출전압이 ②이면 회생 차의 회생전압을 변전소 전압이 대항하게 되므로 회생실효에 다다를 확률이 높아진다.

라. 보호 동작

전철 변전소에서 사용하는 고속도 차단기(54F)와 고장선택 장치(50F)는 아크, 단락 등의 고장으로부터 급전계통을 보호를 위해 조합해서 고장을 판단하고 연락차단에 의하여 고장구간을 격리하는 방법을 사용하고 있으며, ΔI 형 50F계전기는 급전선의 부하전류에 관계없이 정방향 전류 증가분만 감지하여 동작함으로써 동일한 전류 증가분이라도 전류의 초기 상승률의 값에 따라 선택율이 달라지므로 이점을 고려해서 역 발차 시는 노치(Notch)의 순차적 투입을 권장한다. 또한 1호선 전철 변전소 2003년 차단기 고장 분류를 보면 전체 고장 중 31%(104건)가 고장선택 계전기(50F)의 자체 감지로 인한 발생이며 그중 상당 부분이 회생 전력에 의한 오동작으로 추정되므로 보호기기 설정이 필요하다. 그리고 동일한 회생성능을 얻기 위해서는 가선전압과 가선전류가 반비례하므로, 가선전압이 감소할 경우 가선전류가 증가하게 됨으로 실 부하 측정과 승객증가를 고려해 과전류계전기(176F)설정치 조정이 필요하다.

전동차 측면에서는 필터 콘덴서 과전압 상태를 검지하는 FCOVD(과전압 감지), 회생제동 중 변전소 계통에 지락이 발생한 경우, 회생전력에 의한 지락사고의 영향을 억제 보호하는 기능을 하는 LGD(지락검지)와 가선 입력전류가 과전류로 흐를시 적용하기 위해, 정상 제어 시 직류 입력전류 최대값의 여유를 갖는 값으로 설정한 IOCD(가선 과전류 검지), 직류의 개폐 및 급전선이 보호용으로 부하전류나 사고 전류 차단을 하는 HSCB(직류 고속도 차단기)의 보호동작을 한다.

6. 결론

직류 지하철 급전시스템에서 발생하는 회생전력 효율화의 다양한 방법으로 에너지 저장시스템인 슈퍼 캐피시터, 대용량 저장 장치(SECS), 등에 대해 알아보았고, 정확한 측정기기가 없어 시뮬레이션을 하지 못했지만 변전소 배출 전압 조정으로 인한 가능성이 있을 거라 사료된다.

회생차량은 인근에 역행 차량이 없으면 회생 실효가 일어나므로 차량의 배차간격을 조정하여 동일 구간에서 회생 제동을 하는 차량과 역행 차량의 중복을 늘려 차량사이 회생 전력 흐름을 많도록 하거나, 역 발차시 단계별 노치(Notch)투입을 하며, 교통수단의 서비스 수준을 나타내는 표정속도(운전 거리/(순주행 시간+정차 시간))가 일정할 때는 회복 운전보다 역에서 정차시간을 줄이는 방법이 바람직하다. 서울시에서 추진하려고 하는 에너지 저장시스템에 의한 에너지 세이빙 방안이 가장 효과적이지만 변압기의 가변 탭을 이용하여 보호 범위를 고려한 송출전압을 조정(3~5%)으로 가선 전압 상승에 따른 회생실효를 방지하여 에너지 효율화 또한 추구할 수 있을 것이다.

역행중인 차량이 역 진입을 위해 제동을 체결할 때 14Km(이론치)이하가 되면 회생제동 소멸신호(Fade off)를 전송하고 Fade 지연(0.5)시간 후 소멸되는 회생제동력을 대신하여 공기제동이 투입되는데, 회생제동이 소멸되지 않는 시점에 회생제동에 의해 상승된 가선 전압으로, 급격한 공기 제동으로의 전환으로 차량의 감속도에 영향을 줌과 동시에 충격을 발생시켜 승차감 영향, 정위치 정차 오차를 발생시킬 수 있다. 또한 차량에 기계적 충격 누적으로 인해 다른 고장을 유발 시킬 수 있다. 선진국은 에너지 효율화로 기계브레이크를 사용을 배제하는 ‘순전기 브레이크’ 개발을 추진하고 있다.

오래된 시설에 의해 정확한 회생전류량 측정과 회생전력 이용이 불가능하므로 시뮬레이션 데이터를 통해 노후 시설 교체가 필요하고, 회생제동은 직류 급전구간만 있었지만 소자개발로 교류구간에도 실용화 되고 있으므로 장기적으로는 교류급전을 고려할 필요가 있다.

서울 메트로의 최고 목표와 사명이 “안전” 과 “정시 운행” 이기에 회생 에너지 유효한 이용과 전압 강하 방지를 위해 승객이 많은 구간에서는 상하선 일괄 균압 장치 설치 또한 필요하다.

참고 문헌

1. 서울특별시 지하철, SMSC 1호선 VVVF 전동차 교육용 교재
2. 서울 메트로, 서울 메트로 2호선 신조 280량 교육 교재
3. 인재 개발원, 전동차 제어
4. 김양수, 유해출 공저, 전기 철도공학, p 97~98
5. 김정철, 전기 철도의 급전 시스템과 보호, p 146~147
6. 이수원, 전기 철도에서의 에너지 절감에 대한 고찰, 철도전문대학 논문집
7. 다카기 료, 궤전시스템과 차량 신기술에 의한 에너지 절약화의 전망, 월간전기(2007.3 전력 저장기술의 동향과 전망)
8. 김성태, 광주 도시철도 회생전력 분석 및 회생 인버터 적용 검토에 관한 연구, 전남대학원 석사학위 논문, 2007.08
9. 장수진, 가선 전압 모의 장치를 사용한 회생전력 제어용 에너지 저장시스템, 성균관대학원 박사학위 논문, 2008.02
10. 이준혁, 전동차 정위치 정차에 영향을 미치는 요인에 관한 실험적 연구, 서울산업대 석사학위 논문, 2008.08
11. 이수길, 전기 철도차량 운행특성을 고려한 열차 전력 품질 개선 연구, 숭실대학원 박사학위 논문, 2010.02