

서울 지하철 6호선에 대한 전력계통 시뮬레이션

이태식*, 문영현,
연세대

성수영,
유신설계공단

윤갑구
에이스기술단

Power System Simulation in Seoul metropolitan subway Line-6 system

TAE-SHIK LEE, YOUNG-HYUN MOON,
Yonsei Univ.

SOO-YOUNG SUNG, KAP-KOO YOON
YOU-SHIN ENG. ACE ENGINEERING, INC

ABSTRACT

This paper details methods used to verify the adequacy of a dc traction power supply for design in Seoul metropolitan subway Line-6 system. Examples of the approach are given for a major subway presently under construction.

The performance of trains operating at maximum system design capacity is modelled using a train simulation program. Using a dc network analyser program, the maximum train operating timetable, and a model of the ac and dc electrical supply system, the electrical performance of the entire system can be modelled over a 24-hour period.

The results of this analysis are used to determine: train voltage at a level sufficient to ensure train schedules; adequacy of traction transformers, rectifier, and switchgear ratings; sizes of the overhead contact system conductors, and ac and dc feeder cables; and power and energy demands at the utility company's supply points for initial and final timetable operations.

KEY WORD : POWER SYSTEM, SIMULATION, NETWORK, SUBWAY

1. 서 론

지하철 시스템 설계계획에 있어 필수적인 단계는 이 시스템이 몇개의 전력공급소를 갖추어야 하고 그 용량이 얼마나 되어야 하는가 하는 전력운영의 전반적인 내용을 파악해야 하고, 그후 최적의 열차운영계획을 수립하고 전력공급 장치나 기기를 적절히 선정하는 것이다.

서울지하철 3,4호선의 시뮬레이션[1]과 부산지하철의 시뮬레이션[2]에 대하여 이미 연구된 바 있고, 건설중인 서울지하철 7호선[3]에 대하여도 보고된 바 있다. 본 연구에서는 응용팩키지 [4]를 사용하여 6호선을 전력 시뮬레이션함으로써 도심 교통문제 해결을 위한 지하철 건설계획시 연구에 도움을 줄 수 있을 것으로 기대된다.

본 연구에서는 이러한 내용을 다루기 위한 예로서 지금 건설중인 서울지하철 6호선을 들었다. [5] 열차간격을 최대투입 가능한 시간인 2분간격으로 운행하고 상하행선의 여러가지 시간격차 운행정시 다양한 전력시스템의 상태를 고찰하고자 한다.

2. 시뮬레이션 구성

- ① 열차 1대 운영시 입력사항
차량특성, 운영조건, 전기설비특성, 선로특성, 선로곡선부 제한속도, 그리고 선로하구배 제한속도등
- ② 에너지 네트워크에서의 입력사항

①에서 얻은 상·하행선 열차의 위치와 전력(P,Q)와 속도와 회생전력 공급특성, 네트워크 구성, 지하철 열차운행 시간표(상·하행선), 전력시뮬레이션 운영계획시간, 각 변전소 정류기에서의 전류유입 선로구성표

③ 전력시뮬레이션

④ 열차운전 출력

운영특성, 전력소모특성, 거리와 시간과 속도와 에너지 요구량 요약, 상·하행선 각 1개열차에 대한 특성 시간표

⑤ 전력네트워크 출력

가. 시뮬레이션 기간동안의 각 변전소별 컨버터 요약
나. 시뮬레이션에 의한 각 시격별 열차전압 요약
다. RMS 전류 요약(네트워크의 AC 전류, 네트워크의 컨버터, DC 트랙, DC 부급전선등)
라. 각 변전소별 측정점에서의 최대와 최소와 평균 전력표
마. 정류기 공급전력과 차량수전전력과 회생전력과 여러 손실

3. 열차운영 시뮬레이션

3.1 데이터 파일들

전동차의 시뮬레이션을 위한 데이터로서는 차량특성과 운영조건과 전기설비 특성, 선로특성등이 요구되어진다. 선로 곡선부 및 선로 하구배 제한속도 범위는 반경 100m - 450m까지 8등급으로 나누어 35 - 80(Km/h) 속도로 제한하고 구배(%)는 20이하 - 35까지를 두고 80 - 65(Km/h) 속도로 놓았다.

(1) 차량특성

차량길이 : 160 M
차량편성 : 4M4T (Tc-M-M-T-T-M-M-Tc)
견인방식 : VVVF(Variable Voltage Variable Frequency)
구동 유도 전동기, 회생제동
차량중량 : M Car (39 ton)
T Car (28 ton)
Tc Car (30 ton)
승객중량 : 20 ton/Car(혼잡율 230% 기준)
차량보조동력 : 30Km/Car

(2) 운영조건

운전시격 : 120초
최대운전속도 : 80 Km/h
정차장 정차시간 : 30 초
가속도 : 3.0 Km/h/sec
감속도 : 3.5 Km/h/sec
비상시 감속도 : 4.5 Km/h/sec

(3) 전기설비 특성

변전소 설치장소는 독바위골등 11개소를 두고 각 변전소의 평균거리는 약 3.0km 정도이며 차량기지 변전소는 별도로 취급하였다. (전차선 선로저항 : .0242 (Ω /Km) (AL-TBar+60Kg Rail), 변압기/정류기저항 : 30 m Ω /대, Air Section : 변전소마다 설치)

(4) 선로특성

역간거리는 약 1.0km이고 6호선은 1 - 7호선과 국철등과 환승이 가능하도록 되어있고 단선구간인 6.540km(용안-독바위골)와 복선구간인 28.576km의 합인 35.116km로서 이루어져 있다. 또한 노선의 종단구배를 상구배(%), 하구배(%)로 들으로서 지하철 열차속력에 반영하였다. (역사설치개소 : 39개소, 선로장 왕복 : 63.7km (단선구간: 6.54km), 동행선 : 35.12 Km, 서행선 : 28.58 Km)

열차는 일직선상의 운행이 아니므로 곡선제원에 대하여도 반영하여 최대 3000(R)m 부터 최소 270(L)m에 이르기까지 기차속도에 반영하도록 하였다.

3.2 시뮬레이션 결과

(1) 운영특성

- 선로거리 : 63.7km
- 평균역간거리 : .937km
- 주행시간(왕복) : 116.93분(7015.8초)
- 표정속도 : 32.68 Km/h
- 시간 간격 : 120 초

(2) 전동차운영 시뮬레이션의 전력소모특성(한 열차의 경우)

- 평균전차선 전압 : 1500 DC-Voltage
- 열차구동 전력량 : 1876.6(Kwh)
- 열차보조 전력량 : 467.8(Kwh)
- 열차수전 전력량 : 2344.4(Kwh)
- 최생가능 전력량 : 1673.0(Kwh)
- 최생가능율 : 28.638%
- 에너지 원단위 : 60.80 (wh/ton-km)
- 26.26 (kwh/tr-km)
- 3.28 (kwh/car-km)

4. 전력계통 네트워크 시뮬레이션

(1) 네트워크 데이터화일 구성

네트워크 데이터화일 구성은 실제 설계시스템과 마찬가지로 적용될 수 있도록 하여 각 선로에 대한 임피던스를 p.u. 단위로 선로구간마다 적용하였다.

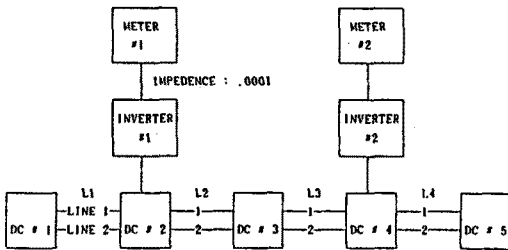


그림 1 네트워크 데이터화일 구성

* 네트워크 데이터화일 구성순서

- STEP 1 : 네트워크 성격구성
- STEP 2 : 미터 이름 및 선로구성
- STEP 3 : 선로에 유입된 좌류 S/S 및 선로구성
- STEP 4 : 미터와 선로를 연결하는 인버터 이름 및 선로구성

(2) 네트워크 시뮬레이션 시간 및 시간간격

지하철 교통이 가장 혼잡하다고 예상되는 오전 8시부터 오전 8시 2분까지 1초, 3초, 5초등의 간격으로 샘플링하여 시뮬레이션을 갖는다. 결과는 Workstation 에서나 486 P/C 에서 같은 결과를 얻을 수 있었다.

(3) 전동차 운행 시간표에 대한 데이터 구성

전동차의 운행시간 스케줄은 상행선에서 차량 8량을 갖고서 6시 50분에 출발하여 종점까지와 하행선에서 차량 8량을 갖고서 6시 50분에 출발하여 시작점까지 운행토록 하여 총 68회수의 기차를 달리게 하여 놓고 한사이클인 2분에 대하여 고찰하게 된다.

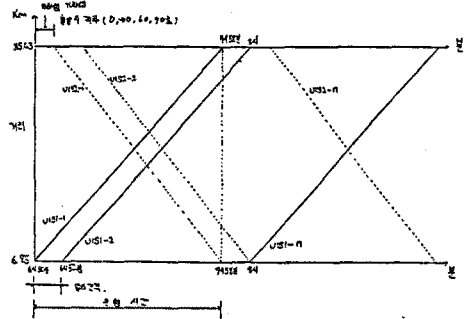


그림 2. 단순화된 열차 데이터 입력도표(상행선 : VIS1-i (i=1, ..., n), 하행선 : VIS2-i(i=1, ..., n))

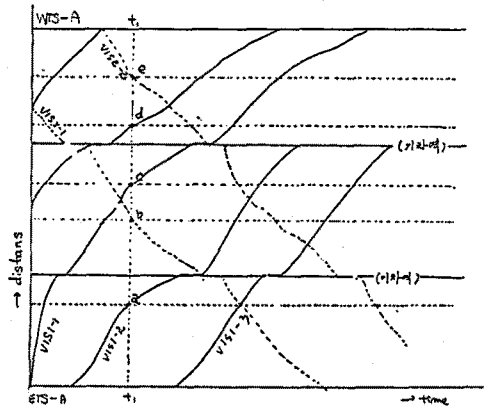


그림 3. 여러 열차의 투입시 운행과 시간과의 관계

5. 시뮬레이션 결과

5.1 시뮬레이션

그림 4에서의 열차운행곡선에서 어려운 점은 열차의 운행시간을 만족하고 에너지 소요량을 최소화하며 열차가 지하에서 운행시 떨림과 탈선이 없이 안정된 조건하에서 낼 수 있는 속도를 정하고 열차운행시 발생하는 최생전력량을 24%-32%정도로서의 관계를 적절하게 만족하는 운행곡선을 찾는 것이었다. 이 최생전력은 이윤한 열차에 의하여 사용될 수 있고 열차부재시에는 변전소로 역류하게 된다.

이를 위하여 현장 운전원의 조언과 문헌에 의거한 방식들[6]을 바탕으로 코스팅(COASTING: 열차에 전력을 투입하지 않고 관성력에 의하여 열차를 움직이게함)을 실시하였다. 기본조건으로서 정거장에 들어가기위하여 브레이크를 밟기전, 후로 3초이상 코스팅하도록 하였으며, 최적의 해를 얻기 위하여 실험고찰의 방식을 선택하였다.

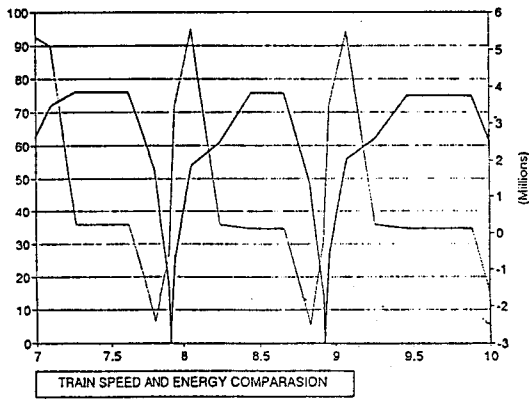


그림 4. 열차속력과 전력량과의 관계

서울지하철 6호선에서는 1500V의 직류를 사용하며 전체적인 전압구성은 1250V - 1550V인 것으로 나타났고, 평균전류량은 약 4,000 AMP로 나왔다. 상·하행선의 결과가 유사하므로 하행선의 전압과 전류도표를 보였다.

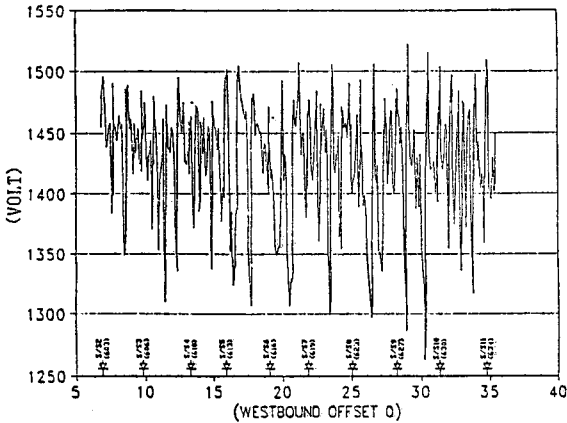


그림 5. 하행선에서의 전압분포

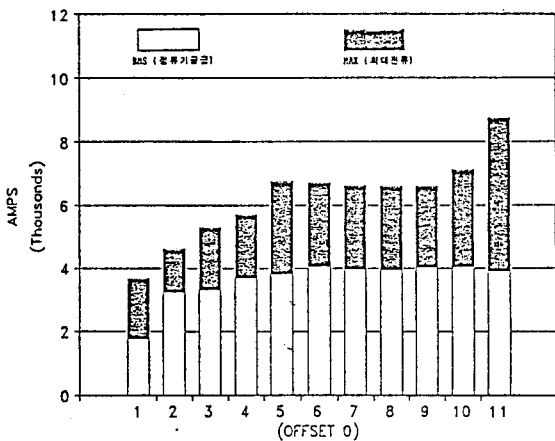


그림 6. 하행선에서의 전류분포

5.2 결과고찰

정류기용량은 정상시 열차 상하행선 운전시차(OFF-SET)를 0, 30, 60, 90초를 주고 5초간격으로 2분간 시뮬레이션하여 각 변전소별 최악의 조건을 찾아서 정류기용량을 검토하였다. 조건으로

서는 각 변전소별로 상시 정류기 2대를 병렬운전하며 예비 1대를 확보하는 것과 상호 호환성을 고려하여 적정의 정류기용량으로 통일하는 것이다.

각 시차별 시뮬레이션 출력결과중 악조건을 선정하여 변전소 소요용량을 계산하면 다음의 표 1과 같다.

표 1. 각 시차별 시뮬레이션 결과중 악조건시의 용량대조표

변전소명	유요전류 (A)	유요전압 (KV)	대당 정류기 용량		승시정류기 용량 (A)	대당정류기 용량 (3002짜리 하용전시 필요용량)	선정류기
			1002짜리 유요전시 필요용량	1502짜리 하용전시 필요용량			
1 북대리점	1774	2661	-	-	3964	1847	3000kw x 2대 (1)
2 용인	3235	4853	2427	1618	4656	1164	3000kw x 2대 (1)
3 수서	3304	4956	2478	1652	5569	1393	3000kw x 2대 (1)
4 원정	4077	6116	3058	2039	8512	2129	3000kw x 2대 (1)
5 대흥	3826	5739	2870	1913	7509	1878	3000kw x 2대 (1)
6 상각지	4828	7227	*3614	2409	9745	2437	3000kw x 2대 (1)
7 한강진	4118	6177	3089	2059	8945	2237	3000kw x 2대 (1)
8 신일	3934	5901	2951	1967	6934	1734	3000kw x 2대 (1)
9 한양	4046	6069	3035	2023	7560	1890	3000kw x 2대 (1)
10 상월계	4027	6041	3021	2014	7139	1785	3000kw x 2대 (1)
11 대농안	3896	5844	2922	1948	8765	2192	3000kw x 2대 (1)
비고		유요전압 / 2대 x 1.5 (kv)	유요전류 / 2대	유요전압 / (1.5x2 년)	승시전류 x 1.5kv/ (3x2년)		

* 북대리점 변전소는 단선정류기임으로 상시 1대 운전용 기준이었음.
* 상각지 변전소의 유요전류 부피증가는 노선구제 조건에 기인함.

6. 결론

본 연구에서는 서울지하철 6호선의 전력계통의 시뮬레이션에 대하여 고찰하였다. 경제적이고 효율적인 정류기용량은 3000kw (2대 병렬운전)이고, 전압면에서도 위험수위인 1100V 이하가 없으므로 안전한 것으로 판단된다.

앞으로 지하철에서의 전력효율성 분석을 위한 모의 시뮬레이션이 가능하고, 지하철의 현안인 고조파문제와 전식(電蝕)문제와 통신장애 문제연구에 상당히 도움을 줄 것으로 기대되며, 철도를 전철화하는 계획시에도 프로그램을 개선하여 적용가능하며 고속전철의 전력계통 모의시뮬레이션도 가능하리라 기대되어진다.

7. 참고 문헌

- [1] A. Daniels, S. D. Jacimovic, 'An Analytical Method for Predicting the Performance of a Rail Transit Power System', IEEE-IAS-1983 Annual meeting, pp246-253, 1983
- [2] J. D. Glover, A. Kusko, S. M. Peeran, 'Train Voltage Analysis for AC Railroad Electrification', IEEE Trans. IAS (ID Appli Soc.)-82-13A, pp207-216, 1982
- [3] 김용순, '서울지하철 7호선 기본설계', 대우엔지니어링, 1991. 11.
- [4] Richard A. Uher, 'TPS (train performance simulator) and ENS (energy network simulator) PROGRAM', Carnegie-Mellon University Pittsburgh, 1984-1989
- [5] 성수영, '서울지하철 6호선 기본설계', 유신설계공단, 1993. 4
- [6] A. Capasso, R. Lamedica and C. Penna, 'Energy Regeneration in Transportation Systems-Methodologies for Power-Networks Simulation', IFAC CONTROL in Transportation Systems, Germany(1983), pp119-124, 1984