교류급전시뮬레이터용 TPS에 관한 연구

조래혁*, 오광해**, 이상중***
서울산업대학교 철도전문대학원*, 한국철도기술연구원**, 서울산업대학교 전기공학과***

A Study on TPS for Power Simulation in AC Electrified Railway.

Rae-hyuck Cho*, Kwang-hae Oh**, Sang-Joong Lee***
The Professional Graduate School Railroad Science Technology*, Korea Railroad Research Institute**. Department of Electrical Engineering of Seoul National University of Technology***

Abstract - This paper presents TPS(Train Performance Simulation) which identified the condition of train operationing in short time.Using the program, the location of train, maximum current, motering power and regenetating of train, could be identified.
This is an important part for Power Simulation.
It is supposed that the grade, the curve, the limit spe ed and the current speed be constant within the time step in the conventional papers. In addition, the errors of the grade and the curve in each station interval ar e neglected.
This paper will introduce improvement method the problem of TPS

1. 서 론

전기철도시스템에서 급전부하인 차량은 기동정지가 빈번하게 반복됨과 동시에 큰 견인력으로 주행해야 하므로 대용량의 부하전력이 요구되고 그 크기는 또한 시공간적으로 급변한다. 이에 따라 시스템의 운전 상황을 모의해서 성능을 평가할 수 있는 컴퓨터 시뮬레이션 프로그램의 필요성이 제기되었다.
차량운행시뮬레이션(TPS,TrainPerformance Simultation)은 선로조건하에서 열차 성능의 적합성여부를 파악 하는데 사용된다. 이 시뮬레이션을 통하여 열차의 현재위치, 속도, 전력소비량, 효율 등을 분석할 수 있다.
기존의 논문은 일정한 간격 내에서는 구배, 곡선, 제한속도, 현재속도가 일정하다고 가정한 것으로 각역간의 구배, 곡선의 오차를 염두에 두지 않았다. 이런 오차를 줄이기 위해서 세부적인 프로그램의 수정이 불가피한 실정이다.
본 논문은 교류급전시뮬레이터를 실행하는데 있어 기본데이터로 활용하는 TPS를 실제로 인천공항선에 적용하여 시뮬레이션을 실행하였다. 시뮬레이션을 통하여 프로그램상의 문제점을 제시하고, 그 개선방향을 제시하고자 한다.

2. TPS 구성

2.1 열차운행 관계식

열차운행은 차량운동방정식을 시간에 대하여 위치, 주행속도, 사용전력등에 대해 계산하는 것이다. 열차운행에 관한 기본수식은 다음과 같다.

$$v = \frac{dx}{dt} \tag{1}$$

$$a = \frac{dv}{dt} = \frac{dv}{dx}\frac{dx}{dt} = \frac{dv}{dx}v \tag{2}$$

위의 식 (1), (2)은 직선운동에서의 위치, 속도 및 가속도에 관계식을 나타낸 것이고, 가속도가 일정할 때 시간에 대한 속도의 함수 v(t)와 거리함수 x(t)는 식 (3),(4)과 같이 나타낼 수 있고, 가속도는 식(5)으로 나타내어진다.

$$v(t) = at + v_0 \tag{3}$$

$$x(t) = \frac{1}{2}at_{2+}v_0t + x_0 \tag{4}$$

$$a = \frac{v(t) - v_0}{t} \tag{5}$$

승객의 쾌적한 승차감을 보장하기 위하여 열차운행시의 저크한계(jerk limit)를 고려한다.
저크한계란 열차가 운행할 때 가속도의 변화율을 제한한 것을 말한다. 이식은 (6)과 같이 나타낸다.

$$a = f(t) = jl \times t \qquad \text{jl : jerk limit [m/sec}^3\text{]} \tag{6}$$

위의 계산식을 통하여 거리, 속도, 가속도를 구할 수 있다.
열차의 운동방정식은 식(7)과같이 나타낸다.

$$\frac{dS}{dt} = V$$

$$\frac{dV}{dt} = \frac{(T - R_r - R_c \pm Ra)}{(1+\chi)W} \tag{7}$$

여기서
T= 견인력/제동력 N
R_r= 주행저항, N
R_C= 곡선저항, N
R_g= 구배저항, N
χ= 탄성계수
W= 열차중량, kg
열차가 현재에서 낼 수 있는 가속도는 모터의 견인 열차저항에 관계된다. 열차운전에 나타낼수있는저항의 은 식(8)과 같이 표현될 수 있다.

$$TR = CR + RR + GR \tag{8}$$

CR= 커브저항 [KN]
RR= 주행저항 [KN]
GR= 구배저항 [KN]
이상과 같은 식으로 가속도, 열차위치, 진행거리를 알 수 있다.

2.2 열차운행 에너지 관계식

열차가 운행하는데 는 에너지소비에따라 세 가지 모드로 구분된다. 역행모드는 열차의 추진모드로써 가선에서 에너지를 받아 전동기에서 에너지를 소비 하고, 제동모드는 전동기에서 에너지를 발생하여 가선으로 돌려주기 위한모드이고, 타행모드는 에너지와 관계없이 지형과 속도에 따른 열차저항에 따라 열차의 진행이 이루어지는 모드를 말한다. 역행시의 전동기에서 소비되는 전동기의 입력에너지는 식(8)과 같다.

전동기의입력에너지=

$$\frac{\text{견인력}\times\text{중량}/\text{전동기수}\times\text{속도}\times 9.81\times 1000/3600}{\text{기어효율}\times\text{전동기효율}\times\text{전동기역률}} \quad (8)$$

전동기 전압은 정토크영역보다 현재속도가 작으면 정토크영역으로 나누어지고, 현재속도가 정토크영역보다 크면 가선전압에서 $\sqrt{6}$을 곱하고,Ⅱ 로 나눈다.이를통하여 전동기의 소비전력을 구할 수 있다.

전동기의 소비전력=

전동기의입력에너지×전동기수×지속시간/(인버터효율×1000×3600) (9)

제동 시에는 전동기는 에너지를 생산하여 가선으로 공급하게 되는 회생에너지는 (10)과같이 나타낼 수 있다.

전동기의회생에너지=제동력×중량/전동기수×속도×9.81×1000/3600×기어효율×전동기효율/전동기역률 (10)

전동기의 출력전압은 제동시의 영역 내에 현재속도가 작으면 제동영역으로 나누고, 현재속도가 제동영역보다 크면 가선전압에서 $\sqrt{6}$을 곱하고, Ⅱ로 나눈다.

이와 같은 조건을 이용하여 통하여 전동기의 회생전력은 식(11)과 같다.

전동기의회생전력=

$$\frac{\text{전동기입력}\times\text{전동기수}\times\text{인버터효율}\times\text{지속시간}}{1000\times 3600} \quad (11)$$

역행과 제동시의 실효(root mean square) 전류 값은 식(12)과 같이 나타낼 수 있다.

$$irms=\sqrt{\frac{1}{T}\sum i^2\triangle t} \quad (12)$$

2.3 알고리즘 구조

기본 알고리즘의 구조는 총 6단계로 구분되어진다.

[단계 1]

열차운행모의시험에 필요한 파라미터의 입력부분을 말한다. 세 가지의 입력데이터를 넣어야한다. 차량데이터, 선로데이터, TPS데이터를 입력해야한다.

[단계 2]

입력데이터를 기준으로 하여 차량의운전시 적용될 수 있는 선로구배나 선로곡선등을 고려하여 제한속도를 둔다.

[단계 3]

열차의 운행모드를 나타내는 구간이다. 열차를 제동할 경우 에는 주어진 속도제한에 조건을 맞추면 제동 점을 형성하게 된다.

[단계 4]

제동구간을 선정한 후 열차의 저항, 견인력, 전력량, 어느 위치에서의 최대전류를 파악가능하다. 제동거리보다 역위치가 적을 경우에는 제동모드를 실행하고, 제동거리보다 역위치가 클 경우에는 전류와 전력을 계산한다.

[단계 5]

프로그램상의 오류를 체크하는 구간을 말한다. 실행시의 오류가 있을시 에는 처음으로 돌아가서 실행하게 되고, 이상이 없을시 에는 다음단계로 이동한다.

[단계 6]

앞의 과정에서 문제가 없을시 에 출력하고, 파일을 닫는다.

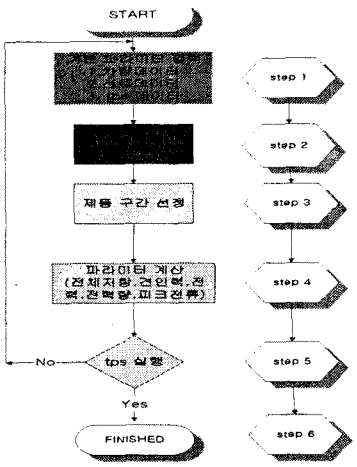

그림 1. TPS의 알고리즘 구조
Fig1. Algorithm of TPS

3. 교류급전시뮬레이터의 개요 및 구조

급전시스템 시뮬레이터는 두 부분으로 나누어진다. 첫 번째는 노선에서 움직이는 차량 운전시뮬레이션 부분이고 두 번째는 차량의 움직임의 결과를 사용하여 급전계통을 회로 해석하는 부분이다. 첫 번째 부분은 윗부분에서 설명한 TPS 프로그램을 말하는 것이고, 두 번째 부분이 급전시뮬레이터에 대해서 설명하는 부분이다. 급전시뮬레이터를 동작하기 위해서는 열차의 운행형태를 파악해야만 출력데이터를 기반으로 하여 전압, 전류, 전력계산결과 집계를 알 수 있다.

급전시뮬레이터의 주요부분은 복수의 열차위치와 열차전류를 산출하기 위해서 운전상태를 시뮬레이션 하는 부분과 복수의 열차와 변전소 등을 포함하는 전력계통의 회로해석부분으로 구성되어진다. 시뮬레이터의 구성은 그림2와 같다.

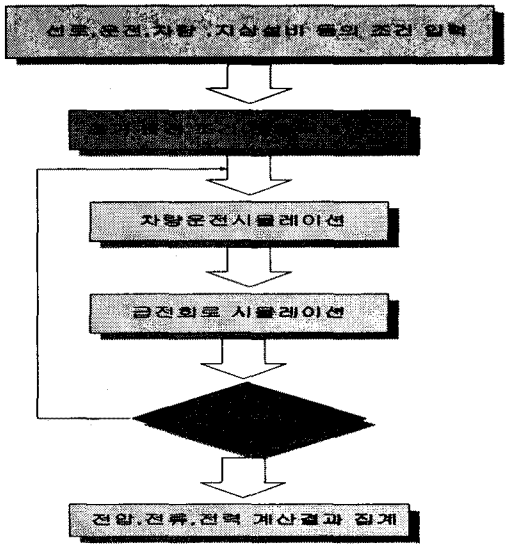

그림2. 교류시뮬레이터 구성도
Fig2. Flowchart of AC Feeding Simulator.

4.사례연구

TPS의 실행상태를 확인하여 시뮬레이션을 실행하였다. 모의실행구간은 인천공항선 3개역을 가정하여 선정하였다.

4.1 입력데이터

▌Train Data는 표 1과 같다.

[표 1] 차량 데이터
Table 1. Data of Train

Mass[ton]	262.756
Vihicle/Train	6
Alpha[km/h/s]	3
Beta[km/h/s]	3.5
Aux[kw]	200
Max_speed	110
T_eff	0.763
B_eff	0.763
M_dy	283.711
begin_train_data	0

▌TPS Data는 표 2와 같다.

[표 2] TPS 데이터
Table 2.Data of TPS

Time-step	1.0
Delta_v[km/s]	5.0
Dwell[s]	60
Run_mode	a
S_speed	110.0
begin_TPS_data	0

▌Station Data는 표3과 같다.

[표 3] Station 데이터
Table 3. Data of Station

No (임의)	Name	Location[m]	begin_station_data
101	SEL(서울역)	1367	.
102	GPO(김포공항역)	21753	.
103	NT1(인천공항1)	59368	.

▌Curve Data는 표4와 같다.

[표 4] Curve 데이터
Table 4. Data of Curve

From[m]	To[m]	Curve[m]	begin_curve_data
1436	1509	2000	.
1809	2102	1600	.
2380	2911	400	.
2985	3522	400	.
3767	4179	1000	.
5022	5375	1200	.
.	.	.	.
.	.	.	.
6751	7089	1400	.
7270	7759	800	.
8120	8193	8000	.
8442	8971	650	.

▌Gradient Data는 표 5와 같다.

[표 5] Gradient 데이터
Table 5. Data of Gradient

From[m]	To[m]	Gradient[m]	begin_gradient_data
1367	1672	2	.
1672	3242	-3	.
3242	3644	30	.
3644	3972	3	.
3972	4278	-20	.
4278	4732	-2	.
4732	6026	-3	.
6026	6600	5	.
6600	7182	20	.
.	.	.	.
.	.	.	.

▌powering Data는 식6과 같다.

[표 6] powering 데이터
Table 6. Data of Powering
A1b=95.906

Aspeed1=35				Aspeed2=60			
x1	35	y1	95.906	x1	60	y1	57.087
x2	50	y2	68.505	x2	90	y2	25.118
x3	60	y3	57.087	x3	110	y3	15.984

▌regereration Data는 식 7과 같다.

[표 7] regeneration 데이터
Table 7. Data of Regeneration

Bspeed1=5				Bspeed2=65				Bspeed3=80			
x1	5	y1	75.3 55	x1	65	y1	75.3 55	x1	80	y1	49.0 95
x2	40	y2	75.3 55	x2	70	y2	65.0 79	x2	100	y2	31.9 69
x3	65	y3	75.3 55	x3	80	y3	49.0 95	x3	110	y3	26.2 60

위의 입력데이터를 근거로 하여 tps를 실행하면 다음과 같은 출력데이터가 나온다.

4.2 출력데이터

4.2.1 요약보고

TPS를 실행을 하여, 표8, 표9와 같은 요약보고와 구간요약보고의 출력상태를 나타내었다. 전체운행거리와 시간, 계획속도,전체가속하는데 필요한 에너지와 회생에너지, 열차 보조전력에너지등을 나타내고, 최대전류값과 열차 운전 장소에서 필요한 최대에너지등을 나타내고 있다.

[표 8] 요약보고 출력 데이터
Table 8.Output Data of Summary Report

total travel distance	116002[m]
total travelling time	5204.4[s]
scheduled speed	80.2[km/h]
total energy for accellerating	1063.1[kwh]
total energy from regenerative braking	167.4[kwh]
total energy for train auxiliaries	280.2[kwh]
peak current	116.6[A]
peak current at location	13164[m]

4.2.2 구간요약보고

구간요약보고란 역간 사이의 정보를 한눈에 알 수 있는 정보이다. 현재의 위치를 파악할 수 있고, 어느 정도의 위치에 존재하고, 전체시간 및 역행, 회생, 보조전력이 얼마나 사용되는지를 나타내고 있다.

[표 9] 구간보고 출력 데이터 1(단위:sec)
Table 9. Output Data 1 of Zone Report

구간	위치[m]	역간거리[m]	DWT[s]	TT[s]	누계
SEL→GPO	21753	20386	60	937.8	997.8
GPO→NT1	59368	37615	60	1544.0	2601.8
NT1→GPO	96983	37615	60	1562.7	4224.5
GPO→SEL	117369	20386	60	919.9	5204.4

[TABLE 10] 구간보고 출력 데이터 2 (단위:kwh)
Table 10. Output Data 2 of Zone Report

구간	역행	회생	보조	계
SEL→GPO	226.15	-38.45	53.21	240.90
GPO→NT1	331.39	-52.64	86.89	365.64
NT1→GPO	297.42	-47.12	87.93	338.22
GPO→SEL	208.16	-29.15	52.22	231.22

4.2.3 구간상세보고

구간상세보고는 열차의 시간, 위치, 속도, 전력, 가속도, 모드등을 30초당 연속적으로 분석을 해서 나타내고 있는 출력형태이다. 그림3,4,5는 상세보고 출력데이터를 나타내고 있다.

가.SEL(서울역)→GPO(김포공항)구간[상행구간]

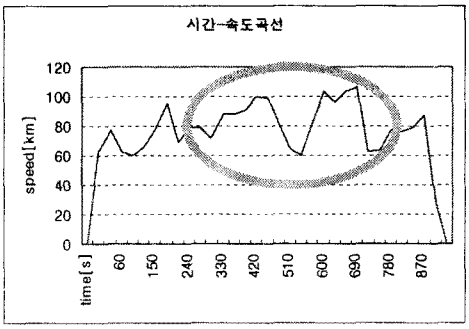

그림3. 서울역- 김포공항구간 시간-속도곡선
Fig 3. Detail Report of Zone (from seoul station to kimpo airport station Time-Speed Curve)
그림3에서 알 수 있는 것은 속도는 구배나 곡선에 따라 제한속도를 둠으로 인하여 평균적으로 70km에서 90km로 운행하고 있음을 나타내고 있다.

나.GPO(김포공항)→NT1(신 공항1)구간 (상행 구간)

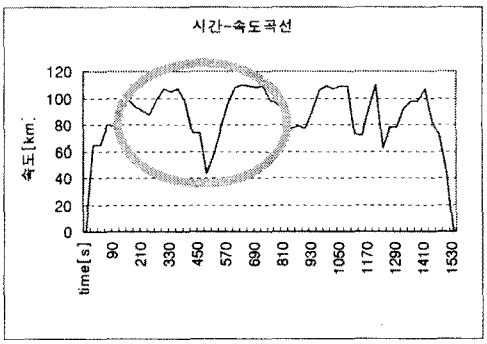

그림4. 김포공항-신 공항1구간 시간-속도곡선
Fig4. Detail Report of Zone (from kimpo station to new airport station 1 Time-Speed Curve)
그림4에서 갑자기 40km로 줄어드는 이유는 구배가 심한 구간이거나 곡선반경이 큰 구간이다.

다.NT1(신 공항1)→GPO(김포공항) 구간[하행구간]

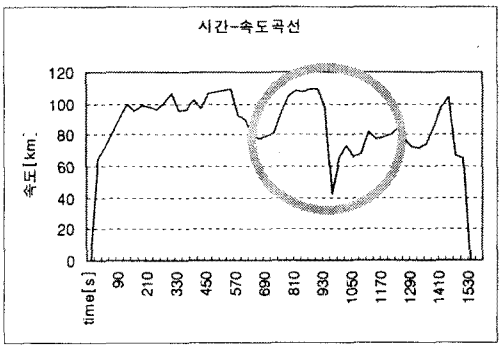

그림5. 신 공항1-김포공항구간 시간-속도곡선
Fig5. Detail Report of Zone (from new airport 1 station to kimpo airport station Time-Speed Curve)

그림5는 구간에 따른 시간-속도의 관계를 나타내고있다. 급격히 속도가 떨어지는 부분은 선로구배, 선로곡선을 고려하여 운전하여야 한다.

라.GPO(김포공항)→SEL(서울역)구간[하행구간]

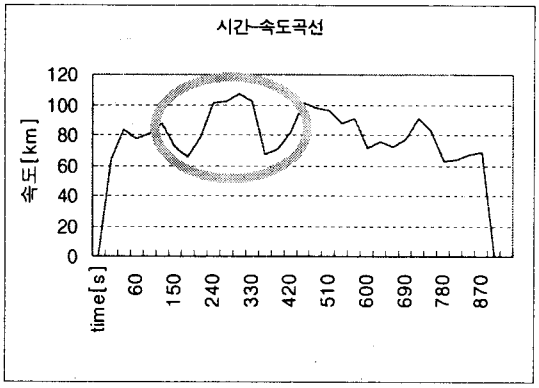

그림6. 김포공항-신 공항1구간 시간-속도곡선
Fig6. Detail Report of Zone (from kimpo station to new airport station 1 Time-Speed Curve)

그림6은 시간에 따른 속도의 변화율을 나타내고 있다. 지하구간은 강체방식을 사용함으로 인하여 최대속도를 110km로 제한을 두었다.

5. 결 론 및 향후 연구 방향

본 논문에서는 실제 신공항선의 기초 자료를 기반으로 시뮬레이션을 실행하였다. 본 연구를 통해 발견된 내용은 다음과 같다.

1. 인천공항선의 3개역의 시뮬레이션을 통하여 구간운행시간, 최대전류 등을 알 수 있고, 열차가 운행 중에 수반되는 역행, 회생, 보조전력등을 파악할 수 있었다.

2. 실측치와 동일한 차량부하 특성을 반영하기 위해서는 구간을 세부적으로 나눌 필요성이 있으며, 이를 위해서는 구간의 특성에 맞는 계산식이 요구된다.

3. 절연구간 적용 시에는 실측치와의 오차가 클 수 있으므로 프로그램 상에 계산식을 포함시켜야 한다.

4. 기존전철과 고속철도에 모두다 적용될 수 있는 하나의 프로그램의 개발이 시급하다.

현재 교류급전회로를 해석하기 위해서는 TPS프로그램을 실행한 후에 그 결과를 교류급전시뮬레이터를 통하여 알 수 있었으나, 향후에는 이런 불편함을 줄이기 위해서 통합형 프로그램의 개발이 필요하다고 본다.

[참 고 문 헌]

[1] "교류급전회로시뮬레이터의개발",일본전기학회 전국대회 논문,NO.1205,pp5-366~5-367,1995.

[2] 한문섭외 1인, "교류 AT급전계통에서의 단권변압기 설치위치의 최적화", 대한전기학회 하계학술대회 논문집,pp1248-1250, 2002.

[3] 이한민외5인, "PSCAD/EMTDC를 이용한 교류 전철급전시스템 해석", 대한전기학회 하계학술대회 논문집,pp1241-1243, 2002.

[4] sphar저 박기성역, "초보자를 위한 visual c++6.0",정보문화사, 1997.

[5] 구철호저, " 할 수 있다! 비주얼c++6",(주)영진출판사, 2000.

[6] 강인권, "전기철도개론", 의제, pp.239~246, 1998.

[7] 이태형외, "한국형 고속전철 열차성능해석 프로그램", 한국철도학회논문집, Vol.6. No.2. pp100~107, 2003.

[8] 강인권편저, "전기철도시스템 공학",(주)성안당, 2002.

[9] 안태기, "열차성능 시뮬레이션 소프트웨어 개발", 철도기술연구원 특수사업부.

[10] 김인철, "전기철도 절연구분장치와 팬터그래프 인터페이스 최적화에 관한 연구",서울산업대학교 철도기술대학원 석사논문,2002.