

전기철도의 DC급전시스템 시뮬레이터

Simulator for DC Power Supply System in Electric Railway

정상기*

홍재승**

Chung, Sang-Gi Hong, Jae-Seung

ABSTRACT

The advance of traction motor control technology and the complexity of the traction power supply system makes the simulation essential in determining the dimension of the traction power supply system. The conventional method, use of the simplified and/or empirical equations, becomes inadequate in optimization of the design. The simulator presented in this paper is a numerical time based simulator running on a PC. The input to the simulator includes the track data, the train characteristic, network data and operating data. Basically the simulator conducts train running simulation and loadflow study repeatedly. The principle algorithms and its output is discussed in the paper.

1. 서론

급전시스템의 설계에서 가장 먼저 결정되어야 하는 사항은 급전변전소의 숫자, 위치 및 용량이 될 것이다. 급전변전소의 숫자를 넉넉하게 하고 비교적 짧은 간격으로 변전소를 설치하면 전력공급 측면에서는 문제가 없다. 그러나 초기 건설비용이 증가하고 유지보수 비용 또한 증가하게 되므로 비효율적인 설계가 된다. 반대로 변전소의 숫자를 줄여서 변전소 간격이 커지게 되면 급전선에서 발생하는 전압강하로 인하여 가선에 차량이 요구하는 전압으로 전력을 공급할 수 없을 지도 모른다. 이들 사이에서 최적의 설계조건을 찾기 위해서는 실제 운전상황을 시뮬레이션해 가면서 각 시간대별로 전력계통의 상태를 분석하는 것이 가장 신뢰성 있고 빠른 방법이 될 것이다. 기존에 사용되던 경험식이나 간략화된 식의 사용은 정확도가 상대적으로 적기 때문에 최적화를 논의할 때는 그 사용이 제한적일 수밖에 없다.

2. 시뮬레이터 개요

본 논문에서 개발한 시뮬레이터는 time base로 계산을 수행한다. 그러므로 시뮬레이터의 결과는 급전시스템의 상태변화를 time step에 따른 시간에 맞추어 원하는 시스템을 해석한다. 급전시스템을 시뮬레이션하기 위해서는 노선에서 움직이는 차량의 시뮬레이션(Train Performance Simulation: TPS)과 차량의 움직임의 결과를 사용하여 전력계통을 해석하는 것이 필요하다. 시뮬레이션의 기본 알고리즘은 두 가지 방법이 있다. 첫

* 한국철도기술연구원 경량전철연구팀 책임연구원, 비회원

** 한국철도기술연구원 경량전철연구팀 연구원, 비회원

번째는 그림 1에 보여지는 것과 같이 차량이 한 time step만큼 움직이고 이 결과에 의해 조류해석을 하고 또 이 조류해석의 결과에 의해 차량을 한 time step만큼 움직이는 과정을 반복(loop)하는 것이다. 또 다른 방법은 차량 한 편성이 노선 구간을 운행할 때의 운행 특성을 미리 모두 계산하고 다음에 조류계산을 할 때에는 차량의 움직임에 대한 data를 앞에서 미리 계산된 결과에서 뽑아서 쓰는 방법이다(loop가 아님). 과거의 직류 traction motor의 제어 방법(chopper 제어)은 가선 전압에 따라 train performance가 영향을 받으므로 그림 1이 적용되어야 한다. 그러나 근래에는 traction motor제어가 VVVF(Variable Voltage Variable Frequency)방법으로 수행됨에 따라 가선전압의 변동이 train performance에 거의 영향을 미치지 않으므로 그림 2의 두 번째 방법도 가능하게 되었다. 본 논문에서 제시하는 시뮬레이터는 두 번째 방법을 사용하였다.

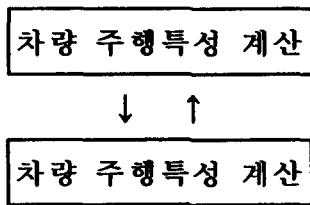


그림 1 Loop의 반복

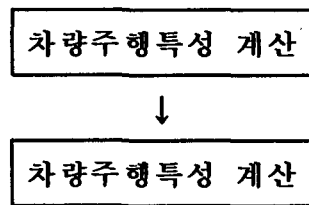


그림 2 Loop의 반복 없음

시뮬레이터의 구성은 차량의 주행곡선을 작성하는 주행특성 모듈, 주행곡선 및 운행 스케줄에 의해 차량의 위치 및 부하를 결정하는 차량운전모듈 및 차량의 위치 및 부하 상태에 따라 급전시스템의 상태를 분석해 주는 조류해석모듈의 세 가지로 크게 구분된다. 주행곡선은 특정한 차량이 특정한 노선의 구간을 운행할 때의 특성, 즉 시간에 따른 속도, 위치, demand power를 말하며 차량운전모듈은 운전곡선 및 운행스케줄을 입력받아, 차량의 위치 및 부하를 시간에 따라 조류해석모듈에 전달해주며 조류해석모듈은 급전시스템의 모델(고정 node)에 전기철도의 부하(moving node)를 추가하여 조류해석을 하는 모듈이다. 그림 3은 이들의 관계를 요약하여 나타내고 있다

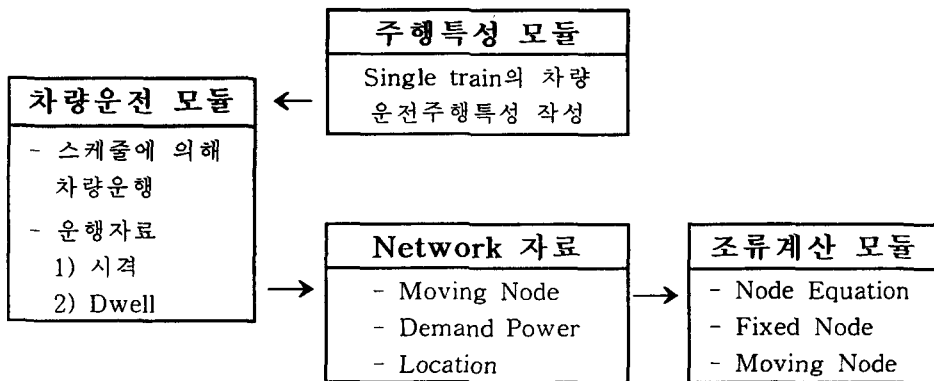


그림 3 시뮬레이터의 구성 및 흐름

3. 주행특성모델

주행특성모델은 특정한 차량 1편성이 특정한 노선을 주행할 경우 차량의 위치, 속도, 소요전력 등의 자료를 시간에 따라 작성한다. 이것은 통상 주행곡선이라 불려진다. 주행곡선은 차량을 어떠한 방법으로 운전하는가에 따라 여러 가지의 주행곡선들이 얻어질 수 있는데, 급전시스템의 설계를 위한 시뮬레이션에서는 열차의 자동운전 시 적용되는 운전모드를 선택하였다. 이것은 조건이 허락하는 한 역과 역사이의 운행시간을 최소화하는 운전모드이다. 다시 말해서 가속 및 감속 시에 최대가속도와 최대감속도가 적용되는 모드이다.

3.1 주행 및 에너지관련 수식

개발중인 고무차륜의 경량전철시스템에 적용되는 주행 및 에너지 관련식은 다음과 같다.

$$TE - R = M \cdot \rho \cdot a \quad (1)$$

$$R = R_{run} + R_{grad} + R_{curve} \quad (2)$$

$$R_{run} = 0.114 \cdot M + (0.2 + 0.3 \cdot N) \cdot V^2 \cdot 12.96 \quad (\text{고무차륜 경전철}) \quad (3)$$

$$R_{grad} = M \cdot g \cdot \text{Grad} \quad (4)$$

$$R_{curve} = 0; \text{ 고무차륜의 경우} \quad (5)$$

$$P = TE \cdot V \quad (6)$$

TE : Tractive effort [N]

R : Total 저항 [N]

M : 차량1편성의 질량 [Kg]

ρ : 관성저항을 고려한 factor, 1.1

a : 차량가속도 [m/s^2]

g : 중력가속도 [$9.8m/s^2$]

V : 차량 speed [m/s]

Grad : 선로의 구배 [%]

N : 편성당 차량 수

R_{run} : 주행저항 [N]

R_{grad} : 구배저항 [N]

R_{curve} : 곡선저항 [N]

P : Demand Power [W]

3.2 주요 알고리즘

역간 주행특성계산을 위한 알고리즘은 그림 4와 같다.

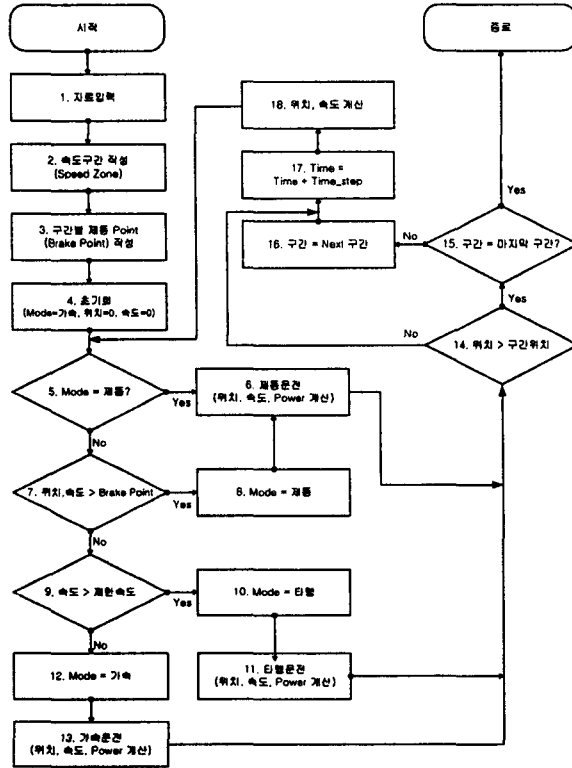


그림 4 역간 운행특성 알고리즘

4. 차량운전모듈

차량이 운행됨에 따라 노선 내에 운전되고 있는 차량의 수, 위치, 차량의 부하 등은 시간에 따라 변한다. 여기서는 차량운행특성모듈로부터의 전구간에 걸친 열차의 주행곡선(그림 5)을 얻고, 사용자가 입력한 열차운행 스케줄, 역사 정차시간 등의 정보를 가지고 각각의 시간에 따라 각 열차의 위치 및 부하를 찾아서 조류해석모듈에 전달하는 역할을 한다.

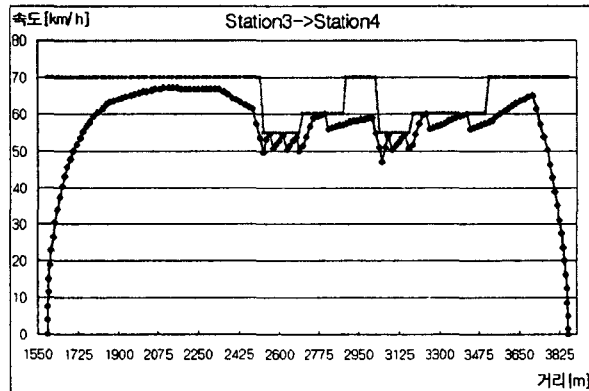


그림 5 열차의 주행곡선(Station3~Station4)

5. 조류계산 모듈

조류해석에 사용되는 Network의 모델링에는 Norton Equivalent Network가 사용되었으며 차량의 부하는 정전력부하로 정의되고 Current Injection Iterative 방식의 알고리즘이 사용되었다.[1]

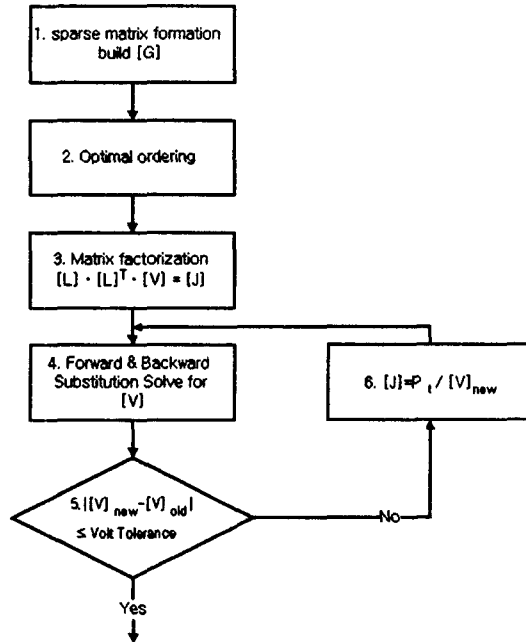


그림 6 Current-vector Iterative Method

6. 목표노선에 대한 모의

목표노선은 철도기술연구원에서 개발하고 있는 경량전철시스템을 위한 가상노선[2]이다. 그림 7과 8은 가상노선에 대한 급전시스템 모델링과 모의결과를 각각 보여준다.

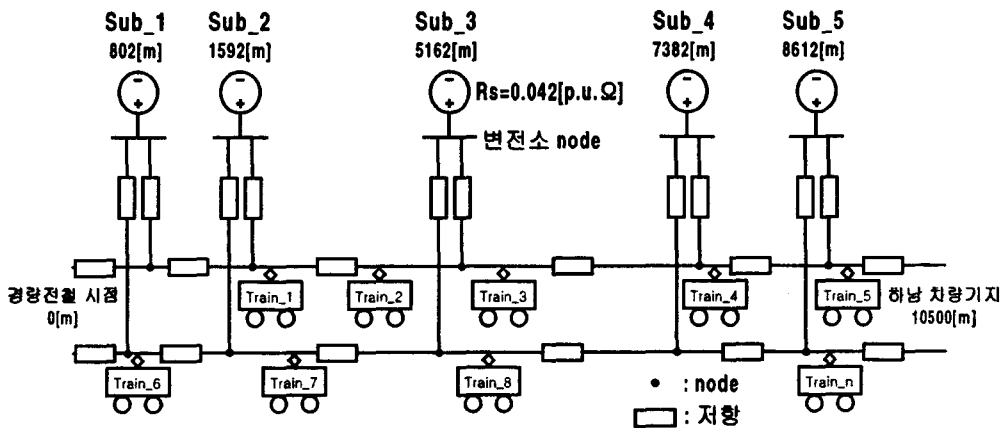


그림 7. 가상노선의 급전시스템 모델링

```

    << Simulation Report >>
Case : Normal, 750v No load Voltage
      : 4 량 1편성
1.0 --- Train Data
      * # of Vehicle: 4
      * Mass      : 76.0[ton]
      * Alpha     : 3.96[km/h/s]
      * Beta      : -3.96[km/h/s]
      * Max_speed  : 70.0[km/h]
2.0 --- Operation Data
      * No of train : 20
      * Headway     : 120[sec]
      * Dwell       : 20[sec]
      * Cross_time  : 30[sec]
      * Aux_pwr     : 80.0[kw]
      * Rail_Res.   : 0.01400[ohm/km]
      * V-noload    : 750[V]
3.0 --- Simulation Data
      * End_time    : 1500.0[sec]
      * Time_step   : 1.0[sec]
      * Tolerance   : 0.00050[p.u.]
4.0 Report on trains
      * Min. volt.  : 643.7[V] at the time=1161 on train_no = 19
      * Max. volt   : 788.8[V] at the time= 586 on train_no = 12
      * Total energy consumed by trains is 1931.556 [kwh]
      * Total energy generated by trains is 691.287 [kwh]
      * The shortest distance between trains(0 - 1) is 675[m] at time 711.0
5.0 Report on substations
    For substation 0
      * Max. demand of 1355.89[kw] occurs at time 1114.0
      * Average demand is 471.76[kw] for the first 1500.0[sec]
      * Max. up_feeder current of 1980.43[A] flows at time 1105.0
      * Max. down_feeder curr. of 1211.08[A] flows at time 1320.0
    For substation 1
      * Max. demand of 1446.01[kw] occurs at time 1000.0
      * Average demand is 474.58[kw] for the first 1500.0[sec]
      * Max. up_feeder current of 1639.79[A] flows at time 614.0
      * Max. down_feeder curr. of 1368.31[A] flows at time 997.0
.....
.....
.....
    For total power supply system
      * Energy supplied from the substations is 1296.47[kwh]
      * Energy flows back to the substations is 26.92[kwh]
      * Energy loss in the power supply sys. is 29.28[kwh]

```

그림 7 시뮬레이션 Summary Report

7. 결론 및 향후 연구과제

본 시뮬레이터는 DC 급전시스템 설계의 Tool로서 개발되었으며 설계에서 가장 기본이 되는 급전변전소위 수, 위치 용량을 결정하는데 필수적인 tool로서 사용될 수 있다. 특히 급전전압이 750vDC의 저압인 경우 기존에 설계회사에서 사용되는 간략화된 계산식은 오차의 범위가 매우 커지기 때문에 시뮬레이터의 활용하여 설계검증이 되어야 한다. 향후 계속해서 사고전류해석 모듈 및 고조파예측 모듈을 추가할 계획이다. 사고전류

의 분석은 설계에서뿐만 아니라 사고원인분석 시에 필수적이며 이러한 사고전류의 분석은 시뮬레이터에 의한 계통의 모의가 선행되어야 하기 때문에 시뮬레이터에 마땅히 추가되어야 할 것이다.

참고문헌

- [1] 정상기, 홍재승, "도시철도의 DC급전시스템 해석 알고리즘", 대한철도학회 춘계 학술대회논문집, pp.78-85, 2000.
- [2] 건설교통부, "경량전철시스템 기술개발사업 1차년도 연구결과보고서(분야:종합시스템엔지니어링), 1999.