

윈도우즈 기반의 교류 전기철도 급전시스템 통합 시뮬레이터 개발

논 문

59-1-13

Development of Integrated Simulator for AC Traction Power Supply System

김 주 락[†] · 김 정 훈^{*}
(Joorak Kim · Jung-Hoon Kim)

Abstract - This paper describes the development of integrated simulator with GUI(Graphic User Interface) for traction power supply system. This simulator consists of a lot of calculation modules such as TPS, train time schedule, line constant, and power supply system analysis. Each module has input and output structure respectively. The algorithms of all modules have confirmed the validity to comparison with field test that is performed on both high speed railway line and conventional line.

Key Words : Electric Railway, AC Traction Power Supply System, TPS, Train Time Schedule, Power Flow

1. 서 론

전기철도 급전시스템의 설계에 있어서 열차의 주행 성능과 관련하여 상세히 검토해야 할 사항은 급전계통의 전압강하이다. 열차가 주행하는 데에 충분한 성능을 보장하기 위하여 전차선의 전압이 적정하게 유지되어야 하지만 여러 대의 열차가 운행하는 상황에서는 전압의 변동이 심하게 나타나기 때문에 시뮬레이션을 통하여 변전소의 위치 및 용량, 급전선로의 용량 등이 설계 시에 반드시 반영되어야 한다. 또한 열차운행 계획의 변경 시에도 급전계통 측면에서 전력 수요가 용량 범위 내에 있는지, 전압 유지가 가능한지 검토해야 한다. 전체 시뮬레이션은 열차주행 시뮬레이션 (Train Performance Simulation; TPS), 열차 운행다이아그램, 급전 시뮬레이션의 순서로 계산된다. TPS는 급전 구간에서 운행하는 열차들의 위치에 따른 속도와 소비전력을 계산하는 것이고, 열차 운행다이아그램은 TPS 결과를 이용하여 정해진 시간동안의 열차들의 운행 스케줄을 작성하는 것이다. 이 두 계산과정으로 급전시스템에 부하의 위치와 크기가 결정되면, 급전시뮬레이션을 통하여 급전구간의 전기량을 계산할 수 있다.

이러한 해석을 계산식에 의한 수작업으로 시행할 경우 많은 시간이 소요되고 그 정확성에도 한계가 있었다. 이에 따라 본 연구진에서는 열차 운전 프로파일을 계산하는 TPS와 급전시스템의 회로 해석 알고리즘을 개발하여, 개별적으로 사용하여 왔다.[1,3,4,5] 그러나 각 프로그램이 개별적으로 개발된 탓에 서로 데이터 입출력 형식이 통일되어 있지 않고, 단순히 수치해석 기반의 프로그램이라 개발자 이외의 사용

자가 사용하기에 많은 불편이 따르는 단점이 있어 사용자 편의성을 고려한 통합형 시뮬레이션 소프트웨어의 개발이 필요하였다.

본 연구에서는 급전시스템 시뮬레이션을 위한 모든 계산 과정을 통합한 GUI 환경의 통합 소프트웨어를 개발하였다. 본 시뮬레이터는 TPS, 운행다이아 및 급전시뮬레이션을 수행할 수 있도록 각각의 계산 모듈을 통합하여 개발하였으며, 운행다이아의 경우 그래픽적인 수정 과정이 가능하도록 개발하여 기존의 수작업에 의존하던 방식을 크게 개선하였다. 또한, 급전시뮬레이션의 경우 2000년 이후 본 연구진에서 개발한 단자망 모델을 이용하여 개발하였다. 참고문헌[1-3]에서 볼 수 있듯이 단자망 모델은 현장 측정값과의 비교를 통하여 결과의 우수성이 이미 검증되었으며, 계산 단계마다 해석을 위한 회로의 구성이 용이하여 빠른 계산 결과를 보일 수 있다.

2. 시뮬레이터 모듈 구성

교류 전기철도 급전시스템은 한국전력의 3상 전력을 수전 받아 스코트 변압기를 통하여 2개의 단상 55kV 전력으로 변환한 후 단권변압기를 통하여 27.5kV의 전력을 열차에 공급한다. 따라서 교류 급전시스템의 전기량 해석을 위해서는 전력공급에 기여하는 고정설비들 즉, 3상전원설비, 스코트 변압기, 전차선로 및 단권변압기 등의 회로 모델과 공급된 전력을 소비하는 열차의 회로 모델이 필요하다. 각 구성 요소들의 회로 모델은 급전시스템의 회로를 구성하게 되고, 이 회로의 해를 구함으로써 전기량 해석이 이루어진다. 급전시스템의 해석은 열차 위치 및 소비전력 해석을 위한 TPS 모듈, 열차 운행다이아 구성 모듈, 급전시뮬레이션 모듈 등으로 구성되며, 그림 1과 같은 절차를 통하여 계산이 이루어진다.

* 펠로우회원 : 홍익대 공대 전자전기학부 교수 · 공박

† 교신저자, 정회원 : 한국철도기술연구원 선임연구원

E-mail : jrkim@krii.re.kr

접수일자 : 2009년 7월 14일

최종완료 : 2009년 12월 2일

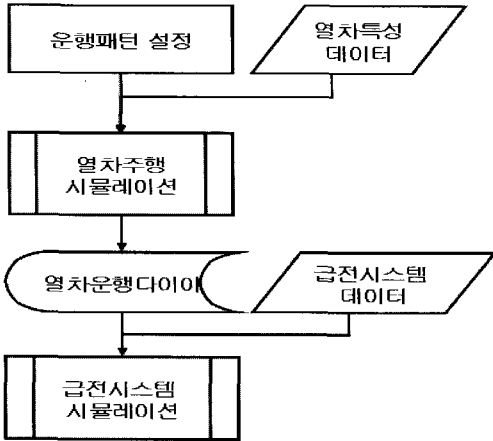


그림 1 통합형 시뮬레이터의 계산 절차
Fig. 1 Calculation flow of integrated simulation

2.1 TPS

급전시스템을 구성하는 전차선로, 변압기 등의 고정설비들은 전압원과 임피던스를 이용하여 회로 모델을 구성할 수 있지만 공급된 전력을 소비하는 열차는 위치와 소비 전력의 시간에 따라 빠르게 변하는 특성을 가지고 있다. 따라서 급전시스템의 정태 해석도 계산 스텝마다 열차의 이동으로 부하 크기와 위치가 변하므로 회로 구성이 갱신되어야 한다. 각 계산 스텝에서 급전시스템 부하의 크기와 위치는 TPS를 통하여 계산 된다.

그림 2는 TPS 모듈의 계산 절차를 보여준다. 먼저, 선로 및 열차 자료를 입력하면 운행구간 각 지점에서의 곡선반경, 구배 및 제한 속도에 따른 속도구간을 작성한 후 정해진 각 속도구간에서의 제동 계획이 작성된다. 제동 계획이 결정된 후에는 열차의 가속, 감속, 또는 타행 등의 운행 모드를 결정 후 열차의 위치, 속도 및 소비전력을 계산하게 된다.

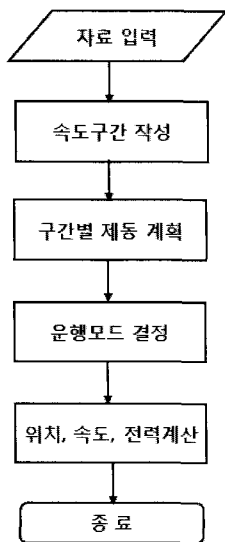


그림 2 TPS 모듈의 계산 절차
Fig. 2 Calculation flow of TPS

그림 3과 4는 개발한 해석 프로그램의 TPS 모듈 입력창이다. 그림 3은 개별 열차 특성을 입력하는 창이고, 그림 4는 선로 특성을 입력하는 창이다. TPS는 열차와 해당 선로의 특성을 입력값으로 하여 위치(시간)에 따른 가속도, 속도, 소비전력 등을 결과로 출력한다. 또한, 시뮬레이션은 최대 가속, 표정속도 모드 등을 선택할 수 있다.

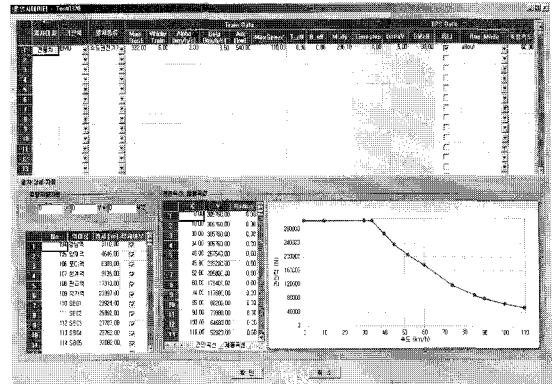


그림 3 열차 데이터 입력창
Fig. 3 Train data input window

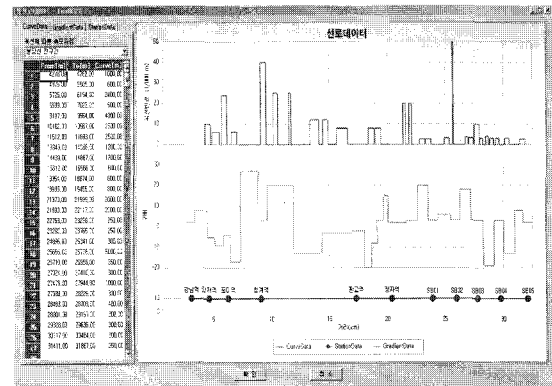


그림 4 선로 데이터 입력창
Fig. 4 Rail line data input

2.2 열차 다이어그램

열차 다이어그램은 TPS에서 계산한 결과인 단일 열차의 위치, 속도, 소비전력을 이용하여 급전시뮬레이션의 시뮬레이션 시간동안의 선로에서 운행하는 열차를 시간에 따라 배열하여 급전시뮬레이션의 전체 부하의 위치와 크기를 결정하는 것이다.

그림 5는 개발한 열차 다이어그램 모듈을 보여준다. 그림의 윗부분은 열차 다이어그램을 작성하기 위한 데이터를 입력하는 부분으로 대상 열차들의 1일 편성수, 운행시작시간, 종료시간 등을 입력하게 된다. 일반적으로 열차 운행은 하루를 기준으로 반복되기 때문에 열차 다이어그램도 1일을 기준으로 작성하는 것이 보통이다. 그림의 아래 부분의 그래프는 작성된 열차 다이어그램이다. 그림에서 보듯이 열차 다이어그램은 TPS에서 계산된 각 열차들의 위치와 속도를 기반으로 영업 운전 시간과 열차간 시격에 따라 배열하는 것이다. 따라서, 열차들의 출발 시간을 시격에 따라 계산하

면 TPS에서 계산한 시간에 따른 위치에 따라 배열할 수 있다. 식(1)은 운행하는 각 열차들의 출발 시간이다.

$$T_s^{m,t} = T_s^{1,t} + n \times H_t \quad (1)$$

여기서, $T_s^{m,t}$: t 열차의 n 번째 출발 시간 [min]

H_t : t 열차의 시격 (Headway) [min]

이와 같이 열차들의 배치가 이뤄진 후에는 다른 종류 열차들끼리의 교점을 확인해야 한다. 이 교점은 두가지 이상의 열차가 동일한 시점 및 위치에 있는 것으로서 해당 열차의 정차시간을 조정하여 재배열해야 한다. 재배열은 그래픽적인 기법을 도입하였다. 즉, 열차 다이어그램에서 해당 열차의 그래프를 마우스로 옮겨주면 열차의 위치, 속도 및 소비전력 데이터가 시간 지면을 가지게 되어 교점이 없어지게 된다.

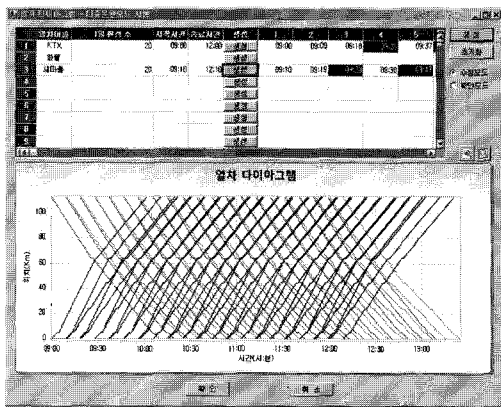


그림 5 열차 다이어그램 입력창
Fig. 5 Integrated simulator windows for train schedule

2.3 급전 시뮬레이션

TPS와 열차 다이어그램 모듈의 실행으로 급전시스템에서 부하의 위치와 크기가 결정되었다. 급전시스템에 전력을 공급하는 한국전력 모선, 송전선로, 스코트 변압기, 전차선로 및 단권변압기 등 고정설비들과 계산된 열차 부하와 함께 회로를 구성하여 회로 해석을 하는 것이 급전시뮬레이션 모듈이다. 본 연구에서 사용한 급전시스템의 회로 모델은 단자망 이론을 이용한 것으로 문헌 [3-5]에서 제안한 모델이다. 단자망 모델은 매 계산 스텝마다 회로의 구성이 달라지는 전기철도 급전시스템의 특성에 잘 부합한다. 열차의 이동으로 부하의 위치가 변하고 이에 따라 설비간 전차선로의 임피던스가 달라지기 때문에 계산 스텝마다 회로 구성이 업데이트되어야 하기 때문이다.

그림 6은 급전시스템의 구성과 함께 각 설비의 회로 모델의 배열을 보여준다. 그림에서 보듯이 한전 모선부터 급전구분소 말단까지 순서대로 회로 모델을 배열하면 각 모델들의 행렬식이 식 (2)와 같이 행렬의 곱으로 계산되어 하나의 행렬식으로 간략화 된다. 식 (2)의 V_S 는 전철변전소에서 공급하는 전압이고, V 와 I 는 구분소의 전압 및 전류를 나

타낸다. 식 (2)의 해 V, I 를 구하면 행렬식에 의해 시스템의 모든 부분에서 전압 및 전류를 계산할 수 있다.

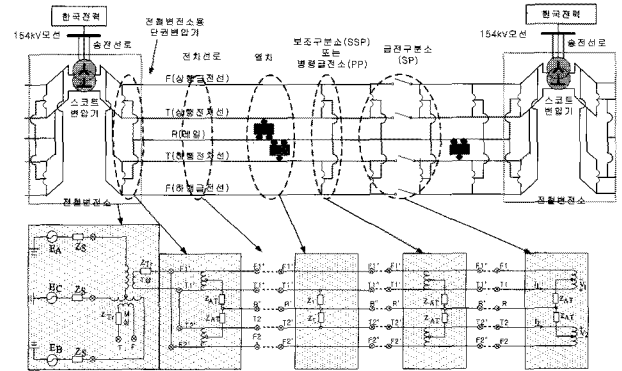


그림 6 급전시스템 구성 및 회로모델
Fig. 6 Configuration and circuit model for traction power supply system

$$\begin{bmatrix} V_S \\ V_S \end{bmatrix} = M_{ZS} \cdot M_{LINE} \cdot M_{AT} \cdots M_{LINE} \cdot M_{TRAIN} \cdot M_{LINE} \cdot M_{SP} \cdot \begin{bmatrix} V \\ I \end{bmatrix}$$

$$\begin{bmatrix} V_S \\ V_S \end{bmatrix} = M \cdot \begin{bmatrix} V \\ I \end{bmatrix} \quad (2)$$

3. 시뮬레이터 개발

본 연구에서 개발한 교류 철도 급전시스템 해석을 위한 통합 시뮬레이터는 'PowerRail'이라는 이름으로 명명하였다. 개발한 시뮬레이터는 기술하였듯이 크게 TPS, 운행다이아, 급전시뮬레이션 등의 계산 모듈로 구성되며, 각 모듈은 하나의 프로그램에 통합 되어 있다. 그림 7은 개발한 통합 시뮬레이터를 실행한 첫 화면을 보여준다.



그림 7 개발한 시뮬레이터 메인 창
Fig. 7 Main window of integrated simulator

3.1 전산모형 개발

시뮬레이터의 개발 구조는 가장 하위단의 .Net Framework 2.0을 기반으로 한 WindowsForm기반의 응용프로그램으

로써 Multiple Document Interface (MDI)환경을 포함하여 여러 가지 프로젝트를 동시에 관리할 수 있고, 자료의 저장은 파일시스템을 이용한다. 시뮬레이터를 구성하는 각 모듈을 관리 프로그램 부분, TPS 모듈 및 운행다이어 모듈은 MS C# 9.0으로 개발하였으며, 또 기존 Matlab으로 개발하였던 급전시뮬레이션 모듈과 전차선로 선로정수 계산 모듈은 MCR(Matlab Common Runtime)을 이용하여 C# 기반의 시뮬레이터와 연계하였다. 또한, 사용자 편리성을 추구하기 위하여, 데이터 입력구조로 Spread를 이용하였으며, 그래픽적인 결과 출력을 위해 ChartFX 7을 이용하여 구현하였다.

통합 시뮬레이터 'PowerRail'은 다음 표 1과 같은 개발환경에서 개발하였으며, 프로그램을 사용하기 위해서는 32bit O/S 환경(Windows XP 추천)과 MS .Net FrameWork 2.0 이 필수적으로 구비되어야 한다.

표 1 통합 시뮬레이터의 개발/사용 환경

Table 1 Development environment of integrated simulator

항 목	내 용	비 고
O/S	MS Windows XP	필수사 용환경
Frame Work	MS .Net FrameWork 2.0	
IDE	MS Visual Studio 2008	
Language	MS C# 9.0	
N. Analysis	Matlab 2007b	
Grid Com.	Spread for Win Forms V4.0	
Chart Com.	ChartFx7 Win Forms	

3.2 메뉴 구성

개발한 시뮬레이터의 전체적인 메뉴 구조는 그림 8과 같다. 메뉴는 크게 프로젝트를 관리하는 부분과 계산을 위한 자료 입력 부분, 그리고 시뮬레이션 실행과 관련된 부분으로 구분된다. 그리고 자료 입력부의 경우 TPS 자료 입력부와 급전계통 입력부로 나뉘며 TPS의 경우 선로와 열차 자료를 입력하고 급전계통의 경우 계통구성, 임피던스, 선로정수 등을 입력하여 TPS, 운행다이어, 급전계통 등의 계산을 순차적으로 실행할 수 있다.

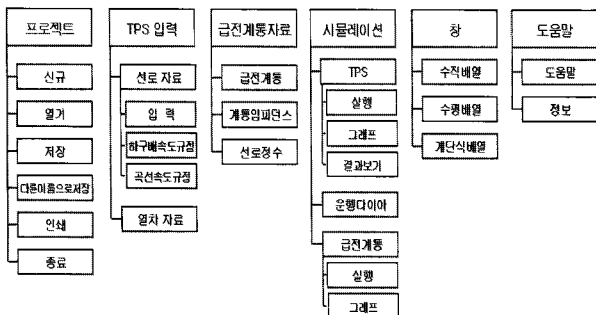


그림 8 개발한 시뮬레이터의 메뉴 구성

Fig. 8 Integrated simulator's Menu

4. 급전시스템 시뮬레이션

본 장에서는 TPS, 운행다이어 및 급전시뮬레이션 모듈을 포함한 통합형 시뮬레이터를 이용하여 TPS부터 급전시뮬레이션 까지 모든 모듈의 기능을 사용하여 해당 급전구간의 전압, 전류, 전력 등을 검토하며, 시뮬레이터의 성능 및 사용법을 기술한다.

4.1 데이터 입력

사례 대상으로 선택한 급전시스템은 KTX와 새마을 열차가 운행하는 구간으로 설정하였으며, M상 및 T상의 급전거리는 각각 28.7km, 23.4km로서 M상과 T상 각 상에 보조급전구분소(SSP)가 2개소 급전구분소(SP)가 1개소로 구성된다. 실제 국내 교류 전기철도 구간중 간선 철도 구간에는 일반적으로 KTX, 새마을, 무궁화, 화물 등의 열차가 운행하지만 본 논문에서는 여객 열차중 속도 차이가 있으며 운행빈도가 가장 빈번한 KTX와 새마을 열차가 운행하는 선로로 설정하여 TPS, 열차 운행다이어 및 급전시뮬레이션을 계산하고자 한다. 표 2는 대상으로 선정할 선로의 TPS 시뮬레이션을 위한 입력 데이터이고 표 3은 급전시뮬레이션을 위한 데이터이다. TPS 시뮬레이션의 경우 표에 나타난 데이터 외에 열차의 견인 및 제동 곡선이 필요하고, 선로의 구배 및 곡선반경이 필요하다.

표 2 TPS 입력 자료

Table 2 Input data for TPS simulation

항 목	데이터	
운행차량	KTX	새마을(EL8100)
차량무게	771.2 [ton]	368 [ton]
가속도	1.69 [km/h/s]	1.44 [km/h/s]
감속도	3.74 [km/h/s]	2.16 [km/h/s]
최대속도	200 [km/h]	150 [km/h]
정차시간	60초	60초
운행모드	최대 가속 모드	최대 가속 모드

표 3 급전시뮬레이션 입력 자료

Table 3 Input data for power flow

항목	데이터
변전소 전원 임피던스 (100[MVA] 기준)	0.7610+j0.4267 [%]
송전선로 임피던스 (100[MVA] 기준)	0.0514+0.2392[%]
주변압기 용량	30/40 MVA
주변압기 임피던스	10[%]
주변압기 X/R	23

4.2 시뮬레이션

4.2.1 TPS 시뮬레이션

통합 시뮬레이터의 실행 과정중 가장 먼저 계산하는 것은 TPS로서 선로 데이터와 열차 데이터를 입력하여 대상 열차

의 속도 프로파일과 소비전력을 계산한다. TPS를 실행한 결과는 그림 9 및 10과 같다. 그림 9는 새마을 열차의 상행 계산 결과를 보인 것으로서 KTX의 상·하행 및 새마을의 하행 결과도 동일한 형태의 그래프로 출력된다. 그림 9는 단일 열차의 운행 속도를 보여주며, 그림 10은 열차가 운행하며 소비한 전력을 나타낸다. 속도 프로파일의 붉은 선은 선로의 곡선반경과 구배에 따른 속도 제한을 나타내며, 모든 열차는 제한 속도에 맞게 운행되어야 한다. 본 시뮬레이터의 TPS도 제한속도 내에서 열차가 운행되었음을 볼 수 있다.

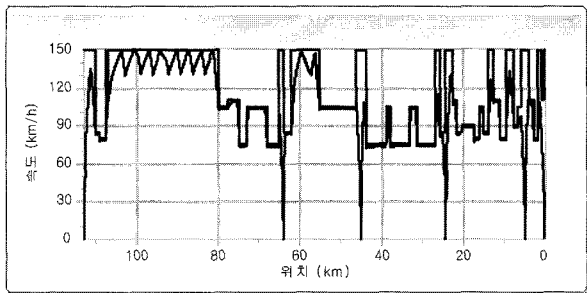


그림 9 TPS 시뮬레이션 결과 (위치에 따른 속도)
Fig. 9 Result of TPS (velocity Vs. location)

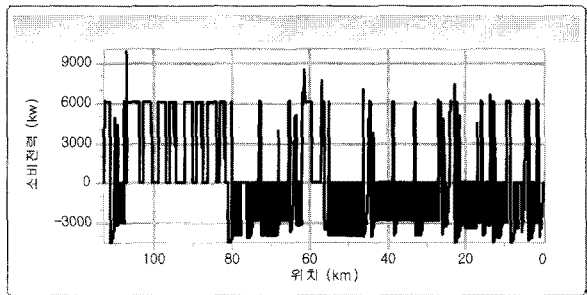


그림 10 TPS 시뮬레이션 결과 (위치에 따른 소비전력)
Fig. 10 Result of TPS (power Vs. location)

4.2.2 열차 다이어그램 시뮬레이션

TPS가 선로에서 운행하는 열차 종류별로 각 열차의 해당 선로 위치에 따른 가속도, 속도 및 소비전력을 계산하는데 반해 열차 다이어그램은 급전시뮬레이션 계산 시간 동안의 선로에서 운행하는 모든 열차의 시간표를 작성하는 것으로서 그림 11은 KTX와 새마을 열차의 TPS 결과를 바탕으로 작성한 열차 다이어그램을 보여준다. 열차 다이어그램은 기술하였듯이 열차 종류별로 편성수와 시작 및 종료 시간을 입력하여 자동으로 생성시킨다. 이때, 열차 종류별로 가속 성능과 시격의 차이로 인하여 그림 11의 점선부분과 같이 두 열차가 동일 시간에 동일한 위치에 중복될 경우가 있다. 이것은 2.2에서 설명하였듯이 해당 부분의 그래프를 마우스로 선택하여 옮겨주면 그림 12와 같이 인근 역에서 정차시간을 늘려 주는 방법으로 해결할 수 있다.

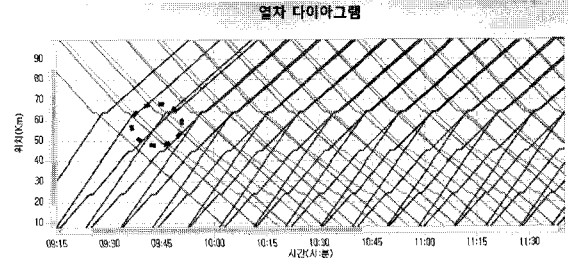


그림 11 열차 다이어그램 (수정전)
Fig. 11 Train schedule diagram (before modification)

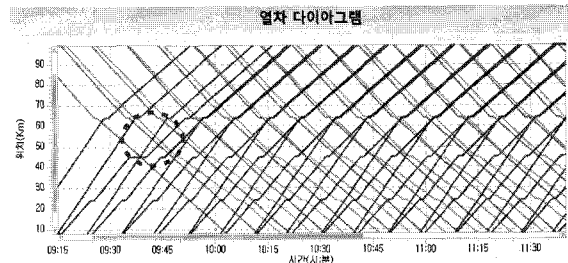


그림 12 열차 다이어그램 (수정후)
Fig. 12 Train schedule diagram (after modification)

4.2.3 급전시뮬레이션

TPS와 열차 다이어그램의 실행으로 급전시스템의 시간대별 부하(열차)의 위치와 유·무효 전력을 계산하였기 때문에 전원 및 전차선로의 임피던스 입력으로 급전시스템의 조류 해석이 가능하다. 이 조류 해석을 위한 모듈이 급전시뮬레이션이다. 이 모듈은 시뮬레이션의 시작 및 종료 시간과 계산 간격을 사용자 임의로 지정하여 실행 할 수 있다. 시뮬레이션의 실행으로 출력되는 결과는 M상 및 T상의 전압, 전류, 전력 등 주변압기 2차측 전기량과 시뮬레이션 시간동안 급전시스템에 진입한 열차의 집전 전압 및 3상 수전부 불평형률이 그래프로 출력된다. 이들 결과중 그림 13 ~ 그림 15에 M상 전압, T상 전류 및 불평형률을 대표로 나타내었다. 나머지 결과들은 급전시뮬레이션 결과 창에서 탭 선택으로 그래프로 확인할 수 있다.

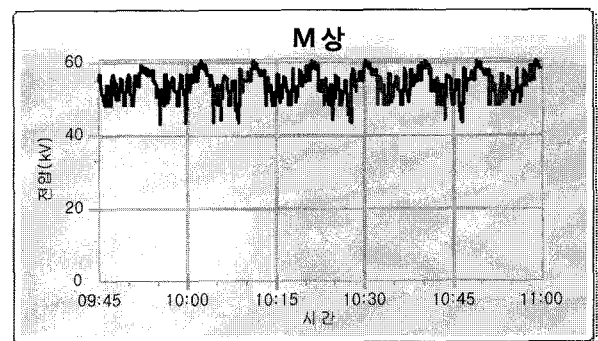


그림 11 급전시뮬레이션 결과 (M상 전압)
Fig. 11 Result of load flow(voltage)

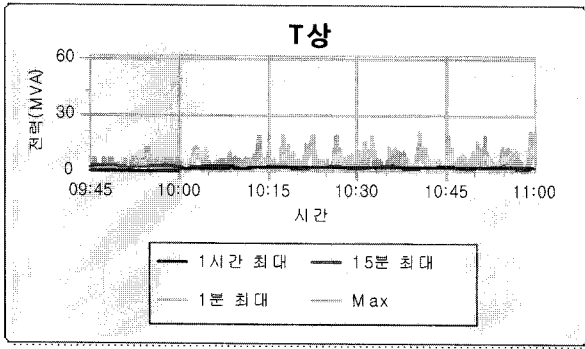


그림 12 급전시뮬레이션 결과 (T상 전력)
 Fig. 12 Result of load flow (power)

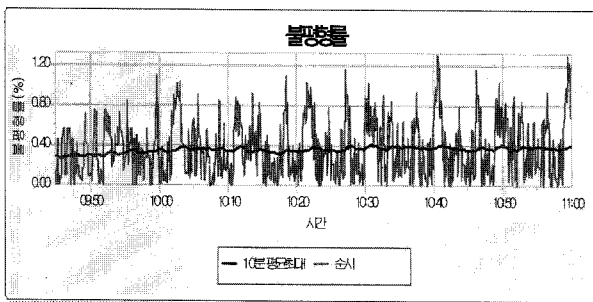


그림 13 급전시뮬레이션 결과 (불평형률)
 Fig. 13 Result of load flow (unbalance)

5. 결 론

본 논문에서는 교류 급전시스템 해석을 위해 개발한 통합 시뮬레이터에 대하여 기술하였다. 개발한 통합 시뮬레이터는 사용자 편의를 도모한 GUI형태를 갖추고 있어 그동안 국내 급전시스템의 해석 시뮬레이션 수행에 있었던 어려움을 해소하는데 기여할 것으로 판단된다.

개발한 통합 시뮬레이터는 열차의 운행 속도, 위치, 소비 전력 등을 계산하는 TPS, 해당 선로의 영업 시작 및 종료 시점, 시격 등으로 열차 다이어그램을 생성하는 모듈, 전차 선로의 선로정수 계산 모듈, 그리고 급전시스템의 조류 해석을 하는 급전시뮬레이션 모듈로 구성되어 있다.

각 모듈은 서로가 입출력에 영향을 미치는 유기적인 관계를 가지고 있으며, TPS 모듈은 개별적으로 실행하여 결과를 얻을 수도 있다. 이들 모듈 중 TPS와 급전시뮬레이션 모듈은 기존에 개발한 알고리즘을 기반으로 향상된 기능을 구비하도록 개발하였으며, 열차 다이어그램 모듈은 수계산에 의존하던 것을 사용자 친화적인 그래픽 기법을 도입하여 편리성을 도모하였다.

본 시뮬레이터의 개발로 신설 급전시스템의 설계 및 기존 급전시스템의 열차 다이어그램 변동에 대한 해석 등에 활용될 수 있을 것이다.

참 고 문 헌

- [1] 정상기, 홍재승, “전기철도의 DC 급전시스템 시뮬레이터”, 한국철도학회 추계학술대회논문집, pp.720-726, 2000. 11.
- [2] 전현규, 정상기, 옥민환, “가상현실기술을 이용한 철도 운행 시뮬레이터 설계” 대한기계학회 춘계학술대회논문집, pp. 4016-4021, 2006. 6.
- [3] 창상훈, 전기철도 급전시스템의 다단자망 모델링, 정태해석과 전력품질 평가, 홍익대학교 박사학위논문, 2001.
- [4] 창상훈, 오광해, 김주락, 김정훈, “6단자망 회로모델을 이용한 전기철도 급전시스템의 고조파 해석”, 대한전기학회논문지, Vol.51 No.6, pp. 255-261, 2002.
- [5] 오광해, 이한민, 창상훈, 김정훈, “경부고속전철 시험선로의 고조파 해석을 위한 10단자 회로망 모델”, 대한전기학회논문지, Vol.51 No.3, pp.99-106, 2002.
- [6] 김강희, 프로그램 입문자를 위한 C#, 한빛미디어, 1999.
- [7] M. Kalechman, Practical Matlab Applications for Engineers, Taylor & Francis, 1999.
- [8] J.R. Shin, et.al., “A Windows-based Interactive and Graphic Package for the Education and Training of Power Analysis and Operation”, IEEE Transactions on Power Systems, Vol.14, No.4, pp.1193-1199, 1998.

저 자 소 개



김주락 (金周 鎔)

1974년 3월 22일생. 1997년 홍익대 전기전기공학부 졸업. 1999년 동 대학원 전기 제어공학과 졸업(공학석사). 2008년 동대학원 박사과정 수료. 2000년~현재 한국철도기술연구원 전철전력연구실 선임연구원

Tel : 031-460-5411
 Fax : 031-460-5459
 E-mail : jrkim@krii.re.kr



김정훈 (金正勳)

1955년 9월 14일생. 1978년 서울대 전기공학과 졸업. 1981년 동 대학원 전기공학과 졸업(공학석사). 1985년 동 대학원 전기공학과 졸업(공학박사). 1981년~현재 홍익대 전자전기공학부 교수

Tel : 02-320-1621
 Fax : 02-338-1621
 E-mail : kimjh@hongik.ac.kr