

열차운행상황을 고려한 고속전철 급전변전소 부하해석

Substation Loading Analysis including Multi-train Operations

이태형*
Lee, Tae-Hyung

박춘수**
Park, Choon-Soo

서승일**
Seo, Sung-II

ABSTRACT

Computerized simulation is becoming an indispensable procedure in the stage of planning, design, and operation of railway systems. This paper presents result of simulation technique for describing electrical performance of the power supply system which comprises the substation, catenary, feeder, and rails where multiple trains are running.

1. 서론

2004년 4월이 되면 경부고속철도 전구간(서울~부산)이 개통하게 되어 우리나라도 고속철도시대에 들어서게 된다. 이에 발맞추어 1996년 12월부터 추진되어온 고속전철기술개발사업에서는 그동안의 연구결과로 7량 1편성의 개발차량을 순수 국내기술로 제작하였고, 경부고속철도 시험선구간에서 시험최고속도 300km/h를 기록하였다. 현재에도 계속하여 시스템의 안정화를 위해 시운전시험 중에 있으며 2007년도에 상용화될 예정이다.

고속철도 선진국에서는 급전계통에서 나타나는 현상을 정확히 분석하기 위해 전기적 특성분석과 함께 열차의 견인력, 운전특성 및 운행 스케줄, 선로상태 등의 열차 운행상황을 고려한 종합적인 해석을 수행하고 있다. 프랑스의 SNCF에서는 ESERALDA라는 소프트웨어 패키지를 사용하여 TGV 시스템의 동적 특성을 포함한 다중열차운행, 추진제어 시스템, 급전계통 전체를 시뮬레이션하고 있다. 영국에서는 VISION/OSLO라는 시뮬레이터를 1987년에 개발하여 사용하고 있고, 스위스에서는 FABEL이라는 소프트웨어를 사용하여 열차운행에 따른 급전계통의 상태를 해석하여 변전소 및 케이블의 용량을 결정하고 있다.[1]

상기 시뮬레이션 소프트웨어의 핵심은 급전계통 해석기법인데 국외에서는 단권변압기의 전류를 동일한 크기와 위상을 갖는 두 개의 성분으로 분해한 후 회로망기법을 적용하여 해석했다[2]. 국내에서는 단일열차를 부하로 가정하고 급전회로망 해석기법을 활용하여 급전계통을 해석하였고[3], 다단자망을 이용한 회로 모델링 기법을 이용하여 정태해석을 수행하였다[4].

본 논문에서는 기존의 급전계통 해석기법이 간과한 열차운행상황, 즉 열차의 견인력 및 제동력 특성, 운전특성 및 운행 스케줄, 선로상태를 고려하여 급전계통을 해석할 수 있는 기법을 제시하고 그 결과를 검토하기 위해 고속철도기술개발사업의 일환으로 현재 경부고속철도 시험선구간에서 시운전시험 중인 한국형 고속전철 개발차량의 상업운행 차량편성인 20량, 11량으로 열차운행 패턴을 설정하였다. 설정된 운행패턴에 따라 열차가 주행할 때 급전계통에서 나타나는 현상을 해석하고 특히 고속전철 변전소의 부하해석 결과를 제시한다.

* 한국철도기술연구원 선임연구원, 정회원

** 한국철도기술연구원 책임연구원, 정회원

2. 급전계통 해석기법

전기철도는 급전계통에서 일어나는 전기적인 현상과 열차에서 일어나는 기계적인 현상이 서로 연계되어 매우 복잡한 시스템을 형성하고 있다. 그림 1은 급전계통 해석기법의 구성을 나타낸다.

TRAIN DYNAMICS 모듈은 열차의 주행특성을 미분방정식으로 모델링하고 선로 상태 및 전후 열차와의 상호관계까지 고려한 시뮬레이션을 수행한다. TRACTION CONTROL SYSTEM 모듈은 견인전동기와 추진제어 시스템의 특성을 모의하는데 열차의 주행 상태와 팬터그래프 전압을 받아들여 견인력과 전력소비를 결과로 내놓는다. POWER NETWORK OPERATION 모듈은 열차의 현재 위치 및 소비전력을 받아들여 변전소 및 급전선에서 전력을 공급하는 상태를 모의한다. 이와 같은 해석을 통하여 변전소별 부하, 급전선 용량, 열차별 팬터그래프 전압 등 실제로 변전소 및 급전계통 설계에 필요한 해석 결과를 얻을 수 있다. 기존의 해석기법은 그림 1의 세 모듈을 종합적으로 고려하지 못하고 POWER NETWORK OPERATION 모듈에만 치우쳐 열차의 위치와 소비전력이 운행패턴에 따라 변한다는 점을 고려하지 못하거나 TRAIN DYNAMICS나 TRACTION CONTROL SYSTEM만 강조해서 판도그래프 전압이 일정하다고 가정하게 된다.

본 논문에서는 상기의 단점을 극복하기 위하여 열차의 위치와 소비전력을 TPS(Train Performance Simulation)로부터 입력받고, 급전계통의 전압강하 계산 결과를 반환하는 알고리즘을 계산에 추가하였다.

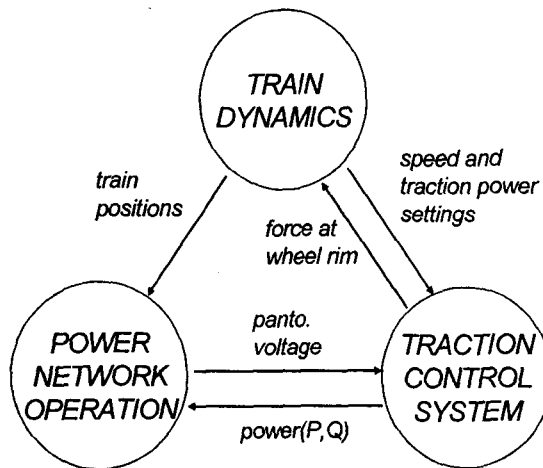
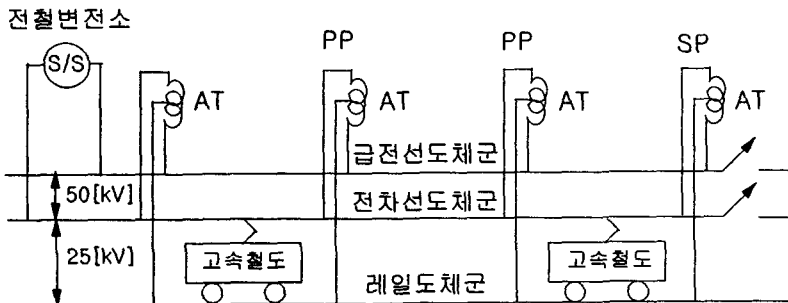


그림.1 급전계통 해석 모듈 구조



AT: 단권변압기(Auto Transformer)

PP: 병렬급전소(Parallel Post), 상하행선 연결개폐기, 상시 on

SP: 급전구분소(Section Post), 변전소간 연결개폐기, 상시 off

그림. 2 2×25kV AT 급전계통의 구성

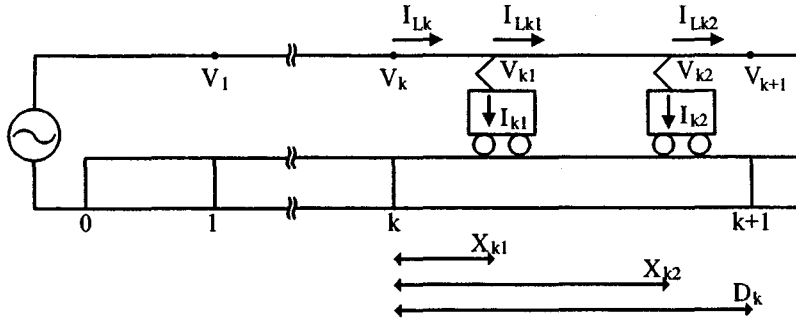


그림. 3 급전계통 간략화 모델

그림 2는 고속철도 급전계통에 사용되는 $2 \times 25\text{kV}$ AT 급전계통 구성도이며 그림 3은 해석을 위해 간략화한 모델이다. 그림 3에서와 같이 단권변압기로 구분되는 구간을 첨자 k 로 나타내고 동일 구간에 열차가 2대 이상 존재하는 경우 첨자 $k1, k2$ 로 표시하면 단권변압기 및 열차 위치에서의 전압은 다음과 같이 유도된다.

1) 열차가 존재하지 않는 구간

k 구간 시작점의 전압이 V_k 이고 그 구간의 전차선에 흐르는 전류가 I_{Lk} 이면 $k+1$ 구간 시작점의 전압은 다음 식(1)로 주어진다.

$$V_{k+1} = V_k - Z_L D_k I_{Lk} \quad (1)$$

2) 열차가 1대 존재하는 구간의 열차전압은

$$V_{k1} = V_k - Z_L X_{k1} I_{Lk} - Z_L^2 X_{k1} \left(1 - \frac{X_{k1}}{D_k}\right) I_{k1} \quad (2)$$

$$V_{k+1} = V_k - Z_L [X_{k1} I_{Lk} + (D_k - X_{k1}) I_{Lk1}] \quad (3)$$

3) 열차가 2대 존재하는 구간의 열차전압은

$$V_{k1} = V_k - Z_L X_{k1} I_{Lk} - Z_L^2 X_{k1} \left(1 - \frac{X_{k1}}{D_k}\right) I_{k1} \quad (4)$$

$$V_{k2} = V_k - Z_L (X_{k2} - X_{k1}) I_{Lk} - Z_L^2 (X_{k2} - X_{k1}) \left[\left(1 - \frac{X_{k2}}{D_k}\right) I_{k2} - \frac{X_{k1} I_{k1}}{D_k} \right] \quad (5)$$

$$V_{k+1} = V_k - Z_L [X_{k1} I_{Lk} + X_{k2} I_{Lk1} + (D_k - X_{k2}) I_{Lk2}] \quad (6)$$

여기서, Z_L 은 전차선, 레일, 피더로 구성되는 회로의 단위길이 당 등가 임피던스를 의미하고, Z_L^S 는 한 구간 내에서 열차의 위치에 따라 변화하는 전류 분포를 반영하기 위한 등가 임피던스이다.

3. 사례검토

결과를 검토하기 위해 아래 표 1과 같은 한국형 고속전철 개발차량(KHST)의 20량과 11량 편성을 대상으로 그림 4와 같이 운행시격을 2004년 서울~대전 구간 피크(2h) 시 시격인 8분으로 하는 경우와 2010년 피크(2h) 시 시격인 4분으로 하는 두 가지 경우를 가정하였다. 정차패턴은 대전, 대구역에 각각 90초씩 정차하는 것으로 하였다. 또한 급전계통을 구성하는 변전소, 병렬급전소, 급전구분소의 데이터도 그림 4에 표시하여 특정 시간의 열차위치와 변전소 공급범위에 존재하는 열차의 수를 파악할 수 있도록 하였으며 전철 변전소의 전압은 27.5kV로 가정하였다.

표. 2 KHST 주요 계원

열차편성	20	11
차량수	20	11
열차총량(비차차) (ton)	780	458
총 길이 (m)	393.5	218.9
최장속	930	460
진동기수	16	12
출력(1대/kW)	1,100	1,100
총출력	17,600	13,200
최고속도(시속)	350	350
최고승객수		
전압(kV)	176.5	132.4
주행시격(kV)	131.4	81.6
가속비격(kV)	0.056	0.107
균일속도(km/h)	389.2	416.1

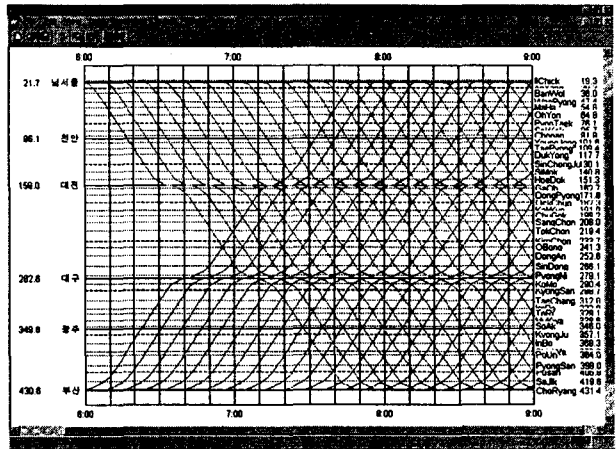


그림. 4 열차운행 계획

그림 5는 KHST11 열차를 이용하여 상하행선 두 개 역에 정차하는 열차운행계획으로 운전시격 4분을 사용하였을 때 특정열차(9030호)에 나타나는 열차전압이다. 특정열차는 시뮬레이션 시간(09:00 - 10:00) 동안 경산변전소 공급구간(266.10kM - 329.10kM)을 주행하게 되는데 공급구간 남쪽말단으로 갈수록 타 열차의 영향으로 전압이 강하되는 것을 확인할 수 있으며 열차출발시간의 불확실성과 상하연계급전을 하지 않는 경우 전압강하가 더 커짐을 볼 수 있었다. 그림 6은 KHST20 열차를 이용하여 상하행선 두 개 역에 정차하는 열차운행계획으로 운전시격 4분을 사용하였을 때 특정열차(9030호)에 나타나는 열차전압이다. 특정열차는 시뮬레이션 시간(09:00 - 10:00) 동안 경산변전소 공급구간(266.10kM - 329.10kM)을 주행하고 있음을 그림을 통해 알 수 있는데 KHST11량보다 전압강하가 더 큰 폭으로 발생됨을 알 수 있다.

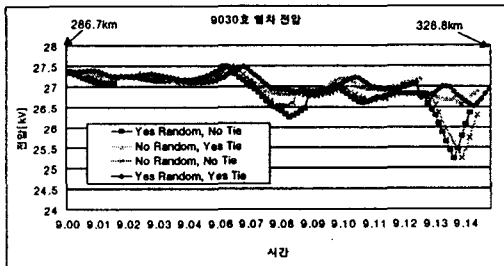


그림. 5 열차전압(시격 4분, KHST 11량)

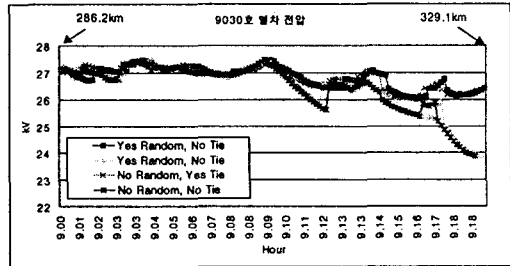


그림. 6 열차전압(시격 4분, KHST 20량)

그림 7 ~ 10은 각 운행패턴에 따른 경산변전소와 신청주변전소의 부하를 표현한 것인데 운전시격에 반비례하는 것을 볼 수 있으며 부하패턴도 상이하게 나타나는 것을 알 수 있다.

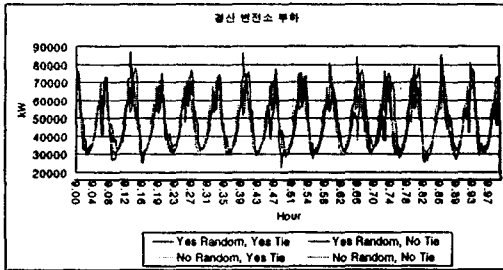


그림. 7 경산변전소 부하(시격 4분, KHST 11량)

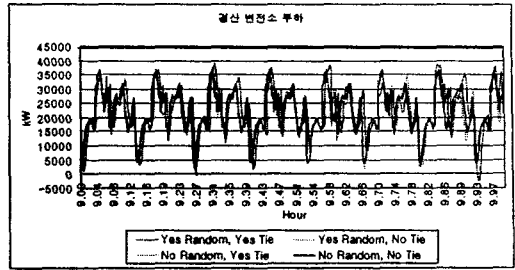


그림. 8 경산변전소 부하(시격 8분, KHST 11량)

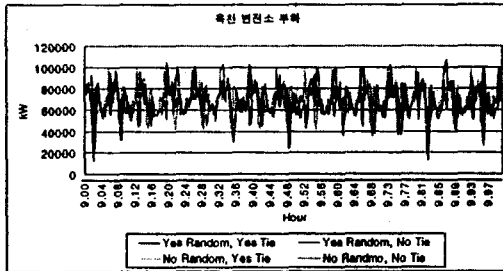


그림. 9 울산변전소 부하(시격 4분, KHST 20량)

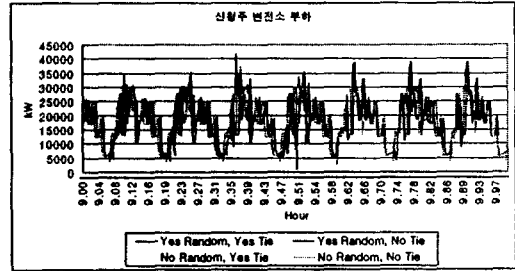


그림. 10 신천주변전소 부하(시격 8분, KHST 20량)

4. 결론

열차운행상황을 고려한 급전계통해석기법을 제시하고 한국형 고속전철 개발차량의 20량, 11량 편성을 대상으로 전철변전소의 부하해석을 수행하여 다음과 같은 결과를 얻을 수 있었다.

- 전철변전소의 부하는 시격에 반비례하고 시격에 따라 부하패턴도 상이하였으며 변전소 말단으로 갈수록 전압강하 현상이 두드러졌다.
- 열차운행시각의 불확실성을 고려하면서 상하연계급전을 운용하지 않는 경우 부하가 정상적인 경우보다 증가되는 뒀을 알 수 있었다.
- 향후 희생전력에 대한 조류계산기법 개발과 비정상적인 운용상태에 대한 검토가 이루어져야 할 것이다.

참고문헌

1. 신형섭 외, "다중열차 운영을 고려한 급전계통 시뮬레이션", 한국고속철도건설공단 보고서 1995
2. Pao-Hsiang Hsi et al., "Simulating On-Line Dynamic Voltages of Multiple Trains under Real Operation Conditions for AC Railways", IEEE Transactions on Power Systems, Vol. 14, No. 2, May 1999
3. 윤재영 외, "급전회로망 해석기법을 활용한 고속전철 조류해석 기법", Trans. KIEE Vol. 49A, DEC. 2000
4. 창상훈 외, "전기철도 교류급전 시스템의 회로 모델링 및 해석기법 연구", 한국철도학회논문집 제3권제4호 2000년

후 기

본 연구는 건설교통부 고속철도기술연구개발사업으로 지원된 "고속철도시스템 신뢰성 및 운영 효율화 기술개발"과제의 연구결과 중 일부입니다.