

속도와 소비전력을 이용한 전기차의 부하모델 개발

김주락 장동욱
한국철도기술연구원

Development of Load Modeling of Locomotive using Velocity and Consumed Power

Joorak Kim Donguk Jang
Korea Railroad Research Institute

Abstract - The accurate analysis on railway traction power system should be carried out a load forecast preferentially. Commonly, it has been performed through Train Performance Simulator (TPS). In the study focused on velocity or location of train, however, the electric power consumption have been computed by converting mechanical power according to given velocity. Therefore, this paper presents a development of a mathematical model for electric load.

The proposed load model is expressed as polynomial to reflect the influence of variance of train speed, that is, the model expresses the power as a function of train speed. In this study, method of the least squares method is used to find each coefficient and field test is performed to acquire data, electric power and speed of train in commercial running line.

이동과 정지를 반복하는 특성상 해석에 어려움이 존재한다. 그림 1은 한국의 교류철도 계통을 간략하게 보인 것으로, 한국전력으로부터 3상전력을 수전받아 스코트 결선의 주변압기로 2×27.5kV 단상전력으로 변환하여 열차에 전기에너지를 공급하는 체계를 갖추고 있다. 앞서도 기술하였듯이 열차의 소비전력은 열차의 이동으로 매순간 변화한다. 이에 따라 급전시스템 해석시에는 항상 TPS가 먼저 선행된다. TPS란 선로상태와 열차의 성능에 따라 정해진 구간에서의 시간별 열차의 위치, 속도 및 소비전력을 계산하는 시뮬레이션이다. TPS에서 계산된 열차의 위치와 소비전력은 급전시스템 해석시 회로 구성이 가능하도록 해준다.

그림 2는 급전시스템 해석의 단계를 TPS와 회로해석 두가지로 구분하여 도식화한 것이다.

1. 서 론

전기철도 급전시스템의 해석은 3상수전설비를 포함한 변전설비 및 전차선로 등과 같은 고정요소상에서 전기에너지를 소비하는 부하인 전기차가 이동 및 정지를 반복하여 구성되는 시스템의 전기량을 계산하는 것이다. 고정요소들이 전원 및 선로를 구성하면 전기차가 부하로 자리하여 하나의 시스템이 된다. 이 때 전기차는 전기 부하이지만 그 위치, 속도 등의 물리적 정보와 입력 전압, 전류, 소비전력 등 전기적 정보가 없어 시스템 해석이 곤란하다. 이를 위해 시간에 따라 위치, 속도 등이 일정가속도 범위내에서 변화하는 전기 부하량을 열차 주행시뮬레이션(TPS ; Train Performance Simulation)을 통하여 위치 및 속도와 그에 따른 소비전력을 구하여 급전계통해석에 이용하고 있다. 그러나 TPS에서 계산한 소비전력은 전기적인 급전계통 상황을 고려하지 않고 전기차의 운행 패턴에만 기어한 기계적 출력을 전기적 변환하며, 이때의 변환손실만을 고려한 것이다. 이에 따라 급전시스템 해석시에 오차가 포함될 수 있는 여지가 많은 단점이 있다.

본 논문에서는 전기차의 소비전력과 열차속도와의 관계에 초점을 맞추어 새로운 전기차 모델링 방안을 제안한다. 이는 전기차를 하나의 시스템으로 고려한 거시적 관점에서 접근하여 전기차의 소비전력을 열차 속도를 변수로 하는 다항식으로 구현되었으며, 모델의 계수 산정을 위해 최소자승법을 이용하여 오차를 최소화하는 모델을 개발하였다. 최소자승법은 실제 주행하는 열차내에서 측정된 데이터를 기반으로 수행되었다. 또한 열차는 주행상태(역행 및 제동상태)에 따라 각각 다른 추진특성을 보이기 때문에 이에 따른 오차를 최소화하기 위하여 각 상태에 따라 다른 모델을 수립하였다.

2. 전기철도 급전시스템 해석

2.1 기존의 해석방법

전기철도 급전시스템의 해석은 시스템의 전기적 상태를 정상상태에서 추정하는 것으로 전기적 부하인 열차가

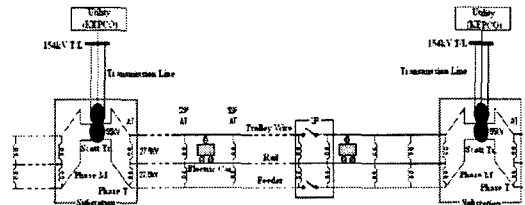


그림 1. 교류 전기철도급전계통

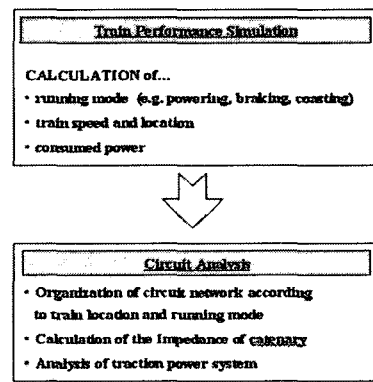


그림 2. 기존 철도급전계통 해석방법

2.2 제안하는 방법

앞 절에서 설명한 기존의 방법은 열차에서 소비하는 전기에너지를 차량의 견인력 혹은 제동력과 속도의 곱으로 표현된 기계적 에너지를 전기적 변환에 따른 효율을 적용하여 계산하여 왔다. 이에 따라 급전시스템 해석시 다소간의 오차가 포함되어 정밀해석에 어려움이 있었다.

본 논문에서는 전기차에서 소비하는 전력을 열차의 이동속도에 따른 다항식 형태로 모델링 하였으며, 전기차

의 운전형태에 따라 역행과 제동부분으로 나누어 각각 모델링 하였다.

이러한 부하모델링은 전기차의 속도를 구하면 모델링된 수식에 의하여 소비되는 전력을 알 수 있게 되어 기존의 TPS에서 소비전력을 계산하는 방법을 사용하지 않고 실측에 의한 전력값을 사용할 수 있게 된다. 따라서 급전시스템 해석의 정확도에 기여할 수 있게 되며, 시뮬레이션 실행 속도도 빨라질 수 있을 것이다. 그림 3은 이러한 계산체계를 도식화한 것으로 그림 2에서 TPS 실행시 열차의 운전형태, 속도, 위치 및 소비전력까지 계산하던 과정중 소비전력계산을 부하모델링 부분에서 담당하게 된다.

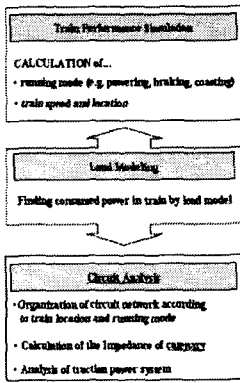


그림 3. 제안하는 급전시스템 해석 방법

3. 부하모델링

본 논문에서 말하는 부하 모델링이란 전기적인 부하를 열차의 속도 변화에 대한 수식으로 표현하는 것을 말하며, 수식화를 위해서 필요한 다량의 데이터는 시험운행 중인 열차에서 속도와 전력을 동시에 측정하여 얻을 수 있었다.

3.1 현장측정

부하모델을 수립하기 위하여 현재 시험운행중인 KTX 열차의 시험운전중에 측정을 수행하였다. 그림 4와 그림 5는 각각 열차의 속도와 전차선과 레일 양단의 소비전력을 측정하기 위한 회로도를 나타낸다. 열차의 속도는 National Instrument의 DAQCard-6062E를 이용하여 측정하였고, 그림 5와 같이 LabView 프로그램을 이용하여 데이터를 취득 및 저장하였다.

3.2 주행상태에 따른 분류

전기 차량은 운전 특성상 역행 및 제동 운전이 반복적으로 나타나며 각각의 운전 특성이 상당한 차이를 나타내므로 일관된 하나의 부하 모델을 수립하는 것은 불가능하다. 따라서 본 연구에서는 전기철도 차량의 운전 형태를 운행 속도 정보를 이용하여 계산된 열차의 가속도를 통해 역행과 제동상태로 구분하여 각각의 모델링을 수립하기로 한다.

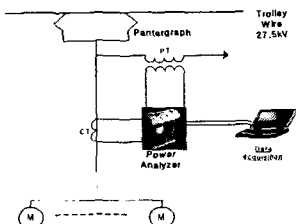


그림 4. 열차의 소비전력 측정을 위한 개념도

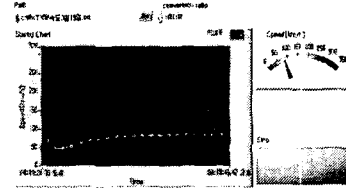


그림 5. 열차속도 측정을 위한 LabView 화면

3.3 수리모델링

본 논문에서는 정밀한 급전시스템 해석을 위하여 열차의 소비에너지를 실측하여 속도에 따른 전기차의 소비전력을 다항식 형태의 식 (1)과 같이 모델링하였다.

$$P = a_0 + a_1 v + a_2 v^2 + \dots + a_m v^m \quad (1)$$

여기서, a_0, \dots, a_m : 다항식의 계수

P : 열차의 소비전력

v : 열차 속도

식 (1)은 m 차의 다항식으로 표현된 전기차 부하모델의 수리적 모형이다. 식 (1)의 계수 a_0, \dots, a_m 의 계수를 맞추어서 부하모델이 완성된다. 즉, 다항식으로 표현된 부하모델의 오차의 제곱이 최소가 되도록 각 계수를 결정하는 문제이다. 오차가 최소로 되게 하려면 편차의 절대값의 총합이나 제곱의 총합이 최소가 되도록 계수를 결정하면 된다.

식 (1)의 제곱의 총합 S 는 식 (2)와 같다.

$$S = \sum_{i=0}^n (P_i - \hat{P}_i) \quad (2)$$

$$= \sum_{i=0}^n (a_0 + a_1 v_i + a_2 v_i^2 + \dots + a_m v_i^m - \hat{P}_i) = 0$$

여기서, n : 측정데이터 개수

\hat{P}_i : i 번째 측정된 열차 소비전력

P_i : i 번째 예측한 열차 소비전력

S 를 최소로 하는 임계값을 계산하기 위해서 S 를 a_i 에 관하여 식(3)과 같이 편미분한다.

$$\frac{\partial S}{\partial a_0} = \sum_{i=0}^n 2(a_0 + a_1 v_i + a_2 v_i^2 + \dots + a_m v_i^m - \hat{P}_i) = 0$$

$$\frac{\partial S}{\partial a_1} = \sum_{i=0}^n 2v_i(a_0 + a_1 v_i + a_2 v_i^2 + \dots + a_m v_i^m - \hat{P}_i) = 0 \quad (3)$$

⋮

$$\frac{\partial S}{\partial a_m} = \sum_{i=0}^n 2v_i^m(a_0 + a_1 v_i + a_2 v_i^2 + \dots + a_m v_i^m - \hat{P}_i) = 0$$

식(3)을 정리하면 식(4)와 같은 $m+1$ 원 1차 연립방정식을 얻는다.

$$a_0 n + a_1 \sum v_i + a_2 \sum v_i^2 + \dots + a_m \sum v_i^m = \sum \hat{P}_i$$

$$a_0 \sum v_i + a_1 \sum v_i^2 + a_2 \sum v_i^3 + \dots + a_m \sum v_i^{m+1} = \sum v_i \hat{P}_i$$

$$a_0 \sum v_i^2 + a_1 \sum v_i^3 + a_2 \sum v_i^4 + \dots + a_m \sum v_i^{m+2} = \sum v_i^2 \hat{P}_i \quad (4)$$

⋮

$$a_0 \sum v_i^m + a_1 \sum v_i^{m+1} + a_2 \sum v_i^{m+2} + \dots + a_m \sum v_i^{m+m} = \sum v_i^m \hat{P}_i$$

이것을 행렬방정식으로 표현하면 식 (5)와 같다.

$$[A]K = B \quad (5)$$

여기서,

$$[A] = \begin{bmatrix} n & \sum v_i & \sum v_i^2 & \dots & \sum v_i^m \\ \sum v_i & \sum v_i^2 & \sum v_i^3 & \dots & \sum v_i^{m+1} \\ \vdots & \sum v_i^2 & \sum v_i^3 & \dots & \sum v_i^{m+2} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \dots & \vdots \\ \sum v_i^m & \sum v_i^{m+1} & \sum v_i^{m+2} & \dots & \sum v_i^{m+m} \end{bmatrix}$$

$$K = [a_0 a_1 \dots a_m]^T$$

$$B = [\sum \hat{P}_i \sum v_i \hat{P}_i \dots \sum v_i^m \hat{P}_i]^T$$

이고, 윗 식을 만족하는 K는 주어진 데이터를 대표하는 다항식의 계수이다.

3.4 모델링 결과

3.2에서 설명한 바와 같이 최소자승법을 이용하여 오차를 최소화하는 모델링은 이동평균을 이용하여 실측 데이터를 필터링한 이후에 모델의 계수를 찾는 방법을 사용하였다.

또한 앞서 설명한 바와 같이 열차의 운행상태에 따라 모델링을 구별하여 수립하였으며, 그 결과는 다음과 같다.

3.4.1 역행시 모델링 결과

역행이란 열차가 전기에너지를 사용하여 전동기를 구동하고 그 회전력으로 열차를 움직이게 하는 힘을 말한다. 즉, 열차가 전기에너지를 소비하는 상태를 말한다.

그림 6의 좌측 그림은 실측된 데이터에서 역행부분을 추출하여 필터링한 결과를 보여주고 있다. 검은색의 점들이 실측데이터이고 붉은색의 실선은 필터링된 결과를 나타낸 것이다.

표 1은 이동평균을 이용하여 필터링한 데이터를 대상으로 최소자승법을 이용하여 얻은 모델링 결과이다. 모델은 7차 다항식으로 구현되었으며, 얻어진 각 계수들을 표에 표시하였다. 또한 그림 6의 우측 그림은 필터링한 실측데이터와 수립된 부하모델의 곡선을 동시에 보여주고 있다. 그림에서 보듯이 서로간의 오차는 편행계수 R^2 이 0.9557로 비교적 신뢰할 수 있는 수준인 것으로 나타났다.

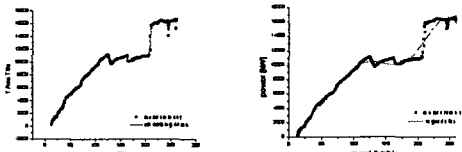


그림 6. 역행시 이동 평균 및 모델링 결과

표 1. 역행시 부하모델링 결과

계수	값	오차
a_0	-6294.56157	989.85072
a_1	715.29588	103.42568
a_2	-23.27152	3.73777
a_3	0.41793	0.06431
a_4	-0.00389	5.90061E-4
a_5	1.8992E-5	2.95944E-6
a_6	-4.60809E-8	7.64793E-9
a_7	4.3756E-11	7.95986E-12

3.4.2 제동시 결과

제동이란 열차가 감속을 목적으로 회생제동을 하는 상태를 말한다. 즉, 열차가 전기에너지를 방출하여 감속력을 얻고자 하는 상태를 일컫는다.

그림 7의 좌측은 실측된 데이터에서 제동부분을 추출하여 필터링한 결과를 보여주고 있다. 검은색의 점들이 실측데이터이고 붉은색의 실선은 필터링된 결과를 나타낸 것이다.

표 2는 이동평균을 이용하여 필터링한 데이터를 대상으로 최소자승법을 이용하여 얻은 모델링 결과이다. 모델은 7차 다항식으로 구현되었으며, 얻어진 각 계수들을 표 2에 표시하였다. 또한 그림 7의 우측은 필터링한 실측데이터와 수립된 부하모델의 곡선을 동시에 보여주고 있다. 그림에서 보듯이 서로간의 오차는 편행계수 R^2 이 0.9557로 비교적 신뢰할 수 있는 수준인 것으로 나타났다.

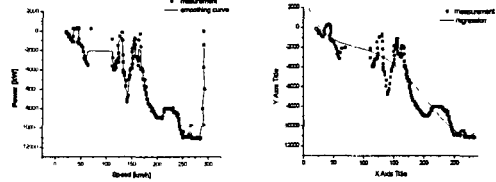


그림 7. 제동시 이동 평균 및 모델링 결과

표 2. 제동시 부하모델링 결과

계수	값	오차
a_0	-6294.56157	989.85072
a_1	715.29588	103.42568
a_2	-23.27152	3.73777
a_3	0.41793	0.06431
a_4	-0.00389	5.90061E-4
a_5	1.8992E-5	2.95944E-6
a_6	-4.60809E-8	7.64793E-9
a_7	4.3756E-11	7.95986E-12

열차의 회생제동시의 부하모델링은 다소간의 오차를 포함하고 있다. 이는 측정시 일관된 제동 데이터 취득에 어려움이 있었기 때문이며, 향후 정밀한 실측을 통하여 모델의 정확도를 높일 수 있을 것이다.

4. 결론

본 논문은 전기차의 부하모델을 제안한 것으로서 결과를 요약하면 다음과 같다.

- 제안한 부하모델은 다항식 형태로 열차의 속도 변화에 대한 소비전력을 나타낸다.
- 제안한 모델은 실측을 통한 데이터를 기반으로 수립하였다.
- 제안한 모델의 각 계수들은 최소자승법을 이용하여 오차를 최소화하도록 수립하였다.
- 모델은 열차의 운행상태에 따라 역행과 제동으로 구분하여 각각의 모델을 수립하였다.

본 논문에서 제안한 부하모델은 속도에 대한 열차의 소비전력을 수식화한 것으로서, 열차의 운행 상태에 중요한 선로조건은 포함하지 않았다. 이런 이유로 아직은 정교하지 못하지만 향후 구체적이고 정밀한 모델로 확장할 예정이다.

또한 본 부하모델은 급전시스템 해석에 이용하여 현재 TPS에 의해 단순 계산한 소비전력으로 수행되는 해석의 정밀성에 많은 기여를 할 것이다.

[참고 문헌]

- [1]IEEE, "Load representation for dynamic performance analysis", IEEE Transaction on Power Systems, Vol.8, No.2, May 1993, pp.472-482
- [2]University of Texas, Arlington, "Determining Load Characteristics for Transient Performance", Vol.1-3 EPRI Report EL 849, 1979
- [3] General Electric Company, "Determining Load Characteristics for Transient Performance", Vol.1-4 EPRI Report EL-850, 1981
- [4] C. Concordia and S. Ihara, "Load Representation in Power System Stability Studies", IEE Trans. on PAS, Vol.PAS-101, pp.969-977, April 1982
- [5] General Electric Company, "Load Modeling for Power Flow and Transient Stability computer Studies", Vol 1 - 4 EPRI Report EL 5003, 1987