

## 전압과 주파수의 변화에 대한 전기철도 차량 부하모델 개발

김주락\* 한문섭\* 심건보\*\* 김정훈\*\*  
한국철도기술연구원\* 홍익대학교\*\*

### Development of Load modeling for Electric Locomotive According to Voltage and Frequency

Kim, Joorak Han, Moonseob Shim, Keonbo Kim, Junghoon  
Korea Railroad Research Institute Hongik Univ.

**Abstract** - This paper presents development of load model for electric locomotive. A proposed load model is type of polynomial equation whose coefficients is determined by least square method. The data used in this model is acquired by measurement of EL8100.

#### 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 기여한 기계적 출력을 전기적 변환 손실만을 고려한 것이다. 이에 따라 급전시스템 해석시에 오차가 포함될 수 있는 여지가 많은 단점이 있다.

본 논문에서는 전기차의 소비전력과 계통 전압 및 주파수와와의 관계에 초점을 맞추어 새로운 전기차 모델링 방안을 제안한다. 이는 전기차를 하나의 시스템으로 고려한 거시적 관점에서 접근하여 전기차의 소비전력을 계통의 전압과 주파수를 변수로 하는 다항식으로 구현되었으며, 모델의 계수 산정을 위해 최소자승법을 이용하여 오차를 최소화하는 모델을 개발하였다. 또한 열차는 주행상태(역행, 제동)에 따라 각각 다른 추진특성을 보이기 때문에 이에 따른 오차를 최소화하기 위하여 따른 각 상태에 따라 다른 모델을 수립하였다.

#### 2. 부하모델링

부하 모델링이란 전기적인 부하를 전압이나 주파수의 변화에 대한 수리적인 표현식으로 표현하는 것을 말하며, 이러한 부하 모델링의 방법에는 거시적 방법과 미시적 방법이 있다.

##### 2.1 부하모델링 방법

거시적 방법은 부하 특성의 측정데이터에 기초한 방법으로 부하의 입력단에 설치된 계측기로부터 전압, 주파수와 그의 변화에 따른 유효·무효 전력을 측정하고, 측정된 데이터로부터 부하모델을 수립하기 위하여 모델식의 파라미터를 식별하는 과정으로부터 부하모델을 수립하는 방법이다.

미시적 방법은 연결된 각각의 개별부하 모델링과 부하의 구

성비로부터 종합적인 부하모델을 수립하는 방법으로서, 각 개별부하에 대한 특성을 파악하기 위한 실험 과정으로부터 개별 부하의 모델링을 수립하고, 각각의 개별부하가 차지하는 구성비를 찾아서 종합적인 부하모델로 축약하는 방법이다.

미시적 방법은 전기 철도 차량의 부하를 구성하는 차량을 전인하기 위한 견인 동력부하와 열차 내의 보조전력부하에 대한 개별부하의 특성을 얻기 위한 실험을 수행하여 각각의 부하에 대한 모델링을 세우고, 또한 각각의 부하 구성비를 찾아내서 종합적인 부하모델을 수립하여야 한다. 그러나 현재의 역건상 각각의 부하에 대한 개별 부하 시험에는 어려움이 있으므로, 본 연구에서는 전기철도차량의 운행시에 차량의 운전 특성을 측정하여 부하모델링을 하는 방법인 거시적 부하 모델링방법을 중점적으로 검토하고자 한다. 하지만, 거시적인 부하 모델링 방법도 전기철도 차량의 운전 상태가 기동, 운행 및 제동 등의 동작이 반복되어 나타나며, 철로의 구배나 기관차를 운전하는 운전자의 운전 습성 등에 의하여도 다른 특성을 나타낼 수 있다는 점 때문에 전기철도 차량 부하 모델링의 어려움을 배제할 수는 없다.

##### 2.2 철도 차량부하의 모델링

본 연구에서 새롭게 제안한 전기 철도급전시스템 해석을 위한 철도 차량부하의 모델링 수립 과정은 그림 1과 같다. 그림 1에서 보는 바와 같이 차량부하 모델링을 위하여 운행중인 철도 차량에 대하여 전압 및 주파수의 변화에 대한 부하의 전기적인 특성인 유효 및 무효전력과 기계적인 특성인 속도 등을 측정하는 시험 측정으로부터 전기 철도 차량의 부하모델을 수립하는 과정을 거쳐게 된다. 전차선과 레일사이에서 운행하는 전기기관차를 하나의 부하로 설정하여 전차선과 레일사이의 전압, 차량을 구동하는 부하전류 및 이의 소비전력을 측정 한 후 데이터의 추출 및 가공과정을 거쳐 수식화 과정을 수행하는 것이다. 수식화 과정이란 미리 정의한 차량부하의 수식적 모델링에 대하여 측정된 전기차의 전압, 전류, 소비전력 등의 데이터를 이용하여 모델의 계수들을 최적화기법을 통하여 구하는 것이다.

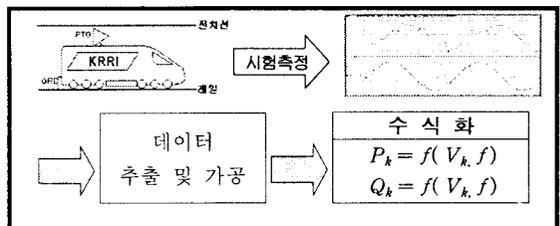


그림 1. 부하모델 수립과정

#### 3. 부하모델 개발

##### 3.1 시험측정

거시적 방법을 이용하여 부하모델을 수립하기 위하여 현재

산업선 및 영동선에서 운행중인 신형기관차(EL8100호대)의 상업운전중에 측정을 수행하였다. 그림 2는 상술한 측정구간을 보여주며, 그림 3은 전차선과 레일 양단의 전압과 소비전력을 측정하기 위한 측정회로도를 나타낸다.

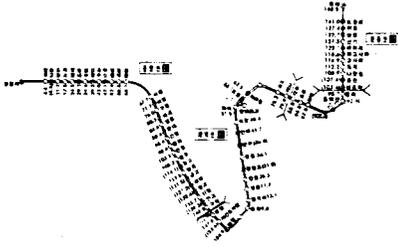


그림 2. 측정 대상구간

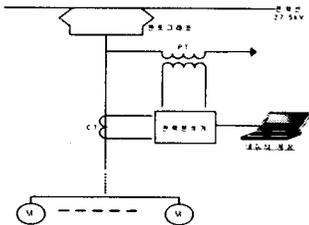


그림 3. 측정 회로도

### 3.2 운행 형태에 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 정보와 측정된 전류의 크기, 전력의 크기 및 역률 등의 정보를 이용하여 역행 및 제동 운전자로 구분하였으며, 각각의 운전 형태에 따른 부하모델을 제안하고자 한다. 운행형태의 종류와 분류기준은 표 1에 따른다.

표 1 운전 형태의 분류

운전 모드	속도 정보	전류의 크기[A]
역행 1	$\frac{dv}{dt} > 0$	12 이하
역행 2		12 25
역행 3		25 50
역행 4		50 100
역행 5		100 이상
제동	$\frac{dv}{dt} < 0$	

### 3.3 수리적 모형

본 연구에서는 전기철도 차량에 대한 부하모델을 위하여 전압과 주파수의 변화에 대하여 유효전력과 무효전력의 특성 변화를 식(1)과 같은 2차 다항식 부하모델과 식(2)와 같은 5차 다항식 부하모델을 제안하고자 한다.

$$P(V, f) = P_0(a_p + b_p \Delta V + c_p \Delta V^2 + d_p \Delta F) \quad (1)$$

$$Q(V, f) = P_0(a_q + b_q \Delta V + c_q \Delta V^2 + d_q \Delta F)$$

$$P(V, f) = P_0(a_p + b_p \Delta V + c_p \Delta V^2 + d_p \Delta V^3 + e_p \Delta V^4 + f_p \Delta V^5 + g_p \Delta V \Delta F + h_p \Delta V^2 \Delta F + i_p \Delta F) \quad (2)$$

$$Q(V, f) = P_0(a_q + b_q \Delta V + c_q \Delta V^2 + d_q \Delta V^3 + e_q \Delta V^4 + f_q \Delta V^5 + g_q \Delta V \Delta F + h_q \Delta V^2 \Delta F + i_q \Delta F)$$

이렇게 수식화된 모델은 최소자승법을 사용하여  $a_p, \dots, i_q$  등의 계수값을 찾음으로서 부하모델링이 완성된다. 즉, 다항식으로 표현된 부하모델에 대한 오차의 제곱이 최소가 되도록 각 계수를 결정하는 문제이다. 오차가 최소로 되게 하려면 편차의 절대값의 총합이나 제곱의 총합이 최소가 되도록 계수를 결정하면 된다. 부하의 표현이 식(3)과 같은 다항식인 경우,

$$Y = k_0 + k_1 x + k_2 x^2 + \dots + k_m x^m \quad (3)$$

제곱의 총합  $S$ 는 식(4)와 같다.

$$S = \sum_{i=1}^n (Y_i - y_i)^2 \quad (4)$$

$$= \sum_{i=1}^n (k_0 + k_1 x_i + k_2 x_i^2 + \dots + k_m x_i^m - y_i)^2 = 0$$

$S$ 를 최소로 하는 임계값을 계산하기 위해서  $S$ 를  $k_i$ 에 대한 편미분을 구하고, 정리하면 식(5)와 같은  $m+1$ 원 1차 연립방정식을 얻는다.

$$k_0 n + k_1 \sum x_i + k_2 \sum x_i^2 + \dots + k_m \sum x_i^m = \sum y_i$$

$$k_0 \sum x_i + k_1 \sum x_i^2 + k_2 \sum x_i^3 + \dots + k_m \sum x_i^{m+1} = \sum x_i y_i$$

$$k_0 \sum x_i^2 + k_1 \sum x_i^3 + k_2 \sum x_i^4 + \dots + k_m \sum x_i^{m+2} = \sum x_i^2 y_i \quad (5)$$

$$\dots$$

$$k_0 \sum x_i^m + k_1 \sum x_i^{m+1} + k_2 \sum x_i^{m+2} + \dots + k_m \sum x_i^{m+m} = \sum x_i^m y_i$$

이것을 행렬방정식으로 표현하면 식(6)과 같다.

$$[A]K = B \quad (6)$$

여기서,

$$[A] = \begin{bmatrix} n & \sum x_i & \sum x_i^2 & \dots & \sum x_i^m \\ \sum x_i & \sum x_i^2 & \sum x_i^3 & \dots & \sum x_i^{m+1} \\ \sum x_i^2 & \sum x_i^3 & \sum x_i^4 & \dots & \sum x_i^{m+2} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \sum x_i^m & \sum x_i^{m+1} & \sum x_i^{m+2} & \dots & \sum x_i^{m+m} \end{bmatrix}$$

$$K = [k_0 \ k_1 \ \dots \ k_m]^T$$

$$B = [\sum y_i \ \sum x_i y_i \ \dots \ \sum x_i^m y_i]^T$$

이고, 위 식을 만족하는  $K$ 는 주어진 데이터를 대표하는 다항식의 계수이다.

### 4. 부하모델 결과

3장에서 제안한 부하모델의 수리적 모델링을 최소자승법을 사용하여 찾은 각 계수값들은 다음과 같다. 제안한 모델은 상기한 바와 같이 2차 다항식으로 표현된 모델과 5차 다항식으로 표현한 모형으로 두가지이다. 두 모형의 수립과정은 동일하며, 결과는 다음과 같다.

표 2는 2차다항식 모델의 결과를 보여주고 있으며, 그림 4와 5는 부하모델 결과를 도식화한 것이다. 그림에서 점선은 수립한 부하모델의 결과를 보여주고 있으며, 실선은 실측한 결과값을 나타내고 있다. 그림 4는 유효전력에 대한 결과이며, 그림 5는 무효전력을 나타내고 있다. 단, 그림들은 열차의 운행형태중 역행 5에 해당한다.

표 3은 5차 다항식 부하모델의 계수를 나타낸 것으로서, a는 상수항이며, b, c, d, e, f 등은 전압의 계수들이고, g, h, i 등은 주파수와 관계된 계수들이다. 또한 이 결과를 도식화하여 보여주는 것이 그림 6과 7이다. 그림 6은 유효전력의

결과이며, 그림 7은 무효전력을 나타내고 있다.

표 2. 2차 다항식 부하모델 계수

		a	b	c	d
역행 1	P	0.0466470	0.007904	-0.402857	-0.472145
	Q	0.0536677	0.0496148	-0.126469	-0.203901
역행 2	P	0.0769576	-0.067498	0.880464	-2.43646
	Q	0.0456881	-0.237769	-3.22888	-0.837982
역행 3	P	0.172924	0.0617684	1.08651	2.61674
	Q	0.0260547	0.0153747	0.874665	1.08073
역행 4	P	0.294026	-0.0615532	-1.28521	-2.97677
	Q	0.0381368	-0.695271	-5.49659	-1.27408
역행 5	P	0.514588	0.682267	8.05785	-11.4529
	Q	0.0398439	-1.01439	-5.6907	-1.68774
계동	P	-0.0875423	-0.061609	6.07292	-11.3282
	Q	0.0478985	-0.201116	-2.20638	-2.14473

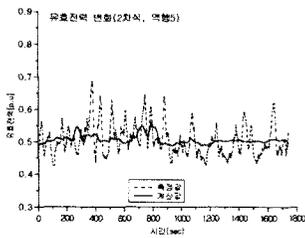


그림 4. 유효전력 변화(역행5)

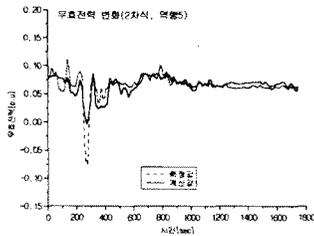


그림 5 무효전력 변화(역행5)

표 3. 5차 다항식 부하모델 계수

		a	b	c	d	e	f	g	h	i
역행 1	P	0.09464726	0.0118165	0.152728	9.52485	203.190	1946.33	22.9915	30.9392	0.118743
	Q	0.053820	0.0226236	-0.784386	35.5847	940.236	5633.47	114.235	1134.31	2.17505
역행 2	P	0.0805662	0.0500814	6.81423	-792.973	-14683.3	-67495.4	200.206	-1491.11	3.60924
	Q	0.0453572	-0.483963	-14.1927	443.841	11017.7	57648.3	-38.8061	-877.325	-341082
역행 3	P	0.17642	0.226921	-5.10173	-326.019	-3770.92	-12934.1	256.529	374.321	10.6279
	Q	0.0232939	-0.177303	6.78705	316.225	4094.14	14014.1	-8.33991	-6306.8	8.40336
역행 4	P	0.247093	-0.532266	8.3517	837.493	14386.9	63914.3	-311.046	2259.7	-14.9026
	Q	0.0464213	-0.584532	-36.1429	-631.8	-6571.31	-23450.4	613.018	7436.94	8.51657
역행 5	P	0.531451	1.17202	-36.8663	-1807.77	-13868.3	-68099.3	1796.68	8710.25	40.6758
	Q	0.0697367	-0.812528	-45.7288	-1104.77	-10436.4	-33703.0	14.3692	955.931	-2.57697
계동	P	-0.090768	1.10316	82.4722	-364.136	-26682.1	-150789.0	-115.014	3142.86	-18.5107
	Q	0.0525285	-0.098613	-14.3092	-190.413	847.839	13537.6	84.4841	630.330	-0.67745

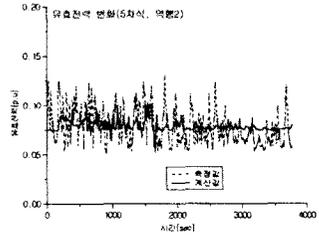


그림 6 유효전력 변화(역행2)

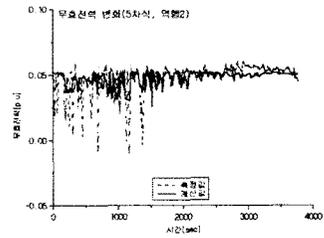


그림 7 무효전력 변화(역행2)

## 5. 결 론

본 논문은 전기차의 부하모델을 제안한 것으로서 결과를 요약하면 다음과 같다.

- 제안한 부하모델은 다항식 형태로 전압과 주파수의 변화에 대한 유효·무효전력을 나타낸다.
- 제안한 모델의 각 계수들은 최소자승법을 이용하여 오차를 최소화하도록 수립하였다.
- 제안한 부하모델을 상업운전중인 신형전기기관차에 적용하였다.
- 신형전기기관차 부하모델의 수립을 위하여 청량리-동해간에서 운행하는 신형전기기관차를 실측하였다.

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

## [참 고 문 헌]

- [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