

파라미터 식별법에 의한 KTX의 부하모델링

김주락* 심건보** 김정훈***
한국철도기술연구원 홍익대학교

Load Modeling of KTX Using Parameter Identification

Joorak Kim* Keon-Bo Shim**
Korea Railroad Research Institute

Jung-Hoon Kim***
Hong-Ik University

Abstract – The electric load components have different characteristics against variation of voltage and frequency. This paper presents the load modeling of electric locomotive by the parameter identification method. Proposed method for load modeling is very simple and easy for application. Proposed load model of the electric locomotive is the combined load of the static and dynamic characteristic load. This load modeling is applied to the KTX to verify the effectiveness of the proposed method. The results of the proposed load modeling by parameter identification follow the field measurements very exactly.

1. 서 론

전기철도 급전시스템의 해석은 3상 전력의 수전설비를 포함한 변전설비 및 전차선로 등과 같은 고정설비와 전기에너지를 소비하는 부하인 전기차가 이동 및 정지를 반복하여 구성되는 시스템의 전기량을 계산하는 것이다. 고정설비들이 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 일정 가속도 범위 내에서 변화하는 전기 부하량을 열차 주행시뮬레이션을 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 전기적으로 변환하며, 이것은 변환손실만을 고려한 것이다. 이에 따라 급전시스템 해석시에 오차가 포함될 수 있는 여지가 있다.

본 연구에서는 차량부하를 정태성분과 동태성분으로 나누어 각각의 부하모델링을 찾은 후에 전체 부하에서 차지하는 구성비의 합으로서 전체 부하의 모델을 찾는 방법을 제안한다. 제안한 모델링을 수립하기 위해서 파라미터 식별법을 사용하였으며, 파라미터 식별은 순환최소자승법(Recursive Least Square Method)과 패턴 검색법(Pattern Search)을 이용하였다. 또한 제안한 알고리즘을 경부고속철도에서 운행 중인 KTX 열차의 측정데이터로부터 부하 모델을 수립하였다.

2. 부하 모델링

KTX 열차의 전기차는 정태부하와 동태부하의 혼합된 부하형태로 전력시스템에서 전기에너지를 소비하고 있다. 이중에서 정태부하는 다항식 형태로, 동태부하는 등가 유도전동기 모델로서 부하모델을 제안하고자 한다. 그림 1은 정태부하와 동태부하가 결합된 총체적인 전기차의 부하 모델을 나타내고 있다.

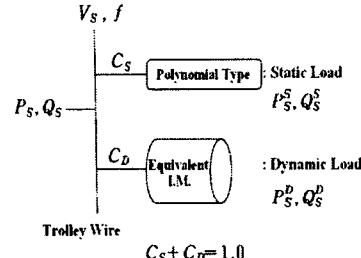


그림 1. 전기차의 부하 모델 개념도

2.1 정태 부하의 모델링

정태 부하는 식 (1)과 같은 5차 다항식의 형태로 모델링 한다.

$$P_s^s(V, f) = a_{s0} + a_{s1}\Delta V + a_{s2}\Delta V^2 + a_{s3}\Delta V^3 + a_{s4}\Delta V^4 + a_{s5}\Delta V^5 + a_{s6}\Delta V\Delta f + a_{s7}\Delta V^2\Delta f + a_{s8}\Delta f^2$$

$$Q_s^s(V, f) = a_{q0} + a_{q1}\Delta V + a_{q2}\Delta V^2 + a_{q3}\Delta V^3 + a_{q4}\Delta V^4 + a_{q5}\Delta V^5 + a_{q6}\Delta V\Delta f + a_{q7}\Delta V^2\Delta f + a_{q8}\Delta f^2$$

P_s^s : 정적 부하의 유효 전력 [p.u]

Q_s^s : 정적 부하의 무효 전력 [p.u]

ΔV : 전압차 [p.u]

Δf : 주파수차 [p.u]

$a_{s0} \sim a_{s8}$: 유효 전력의 다항식 계수

$a_{q0} \sim a_{q8}$: 무효 전력의 다항식 계수

2.2 동태 부하의 모델링

본 연구에서 동태부하는 등가 유도전동기 모델로 표현되며 그림 2는 등가 회로를 나타낸다.

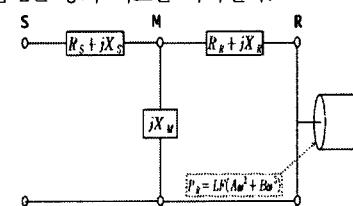


그림 2. 회전부하가 연결된 상태의 유도전동기 등가회로

그림 2에 주어진 유도전동기 등가 회로에 있어서는, $slip$ 으로 추정되는 회로의 직접적인 해결방법이 보통 사용된다. 그러나 이는 일정한 임피던스에 상응하는 것으로 적절하지는 않다. 유도 전동기 에너지가 지속되는 동안 일정 임피던스의 부하가 전압 제곱과 함께 에너지를 소비한다. 슬립은 전압과 주파수에 따라 변동한다.

이 연구에서는 유도 전동기의 해석을 위하여 유도전동기를 S, M, R로서 3개의 모션으로 이루어진 상대적으로 작은 전력 시스템을 제안하였다(그림 2). 그림 2에 대하여 전력 조류 계산 방법[5,6]에 의하여 유도전동기의 해석을 근사적으로 수행할 수 있다.

이러한 가정으로부터 동태 특성의 유도전동기 부하 모델은 식 (2)와 같이 표현할 수 있다.

$$\begin{aligned} P_S^D &= f(V_S, f, Z) \\ Q_S^D &= g(V_S, f, Z) \end{aligned} \quad (2)$$

여기서, P_S^D : 동태 부하의 유효 전력 [p.u]

Q_S^D : 동태 부하의 무효 전력 [p.u]

V_S : 입력 전압 [p.u]

f : 입력 주파수 [p.u]

Z : 유도 전동기의 파라미터[p.u]

유도 전동기의 회전 속도는 ω_m 과 부하의 크기는 다음과 같이 관계식으로 주어진다.

$$P_L = -P_R = LF(A\omega_m^2 + B\omega_m^3) \quad (3)$$

여기서, P_L : 기계적인 부하(Mechanical Load)

LF : 부하 계수>Loading Factor) [p.u]

A : 기계상수(Linear Mechanical Coefficient)

B : 기계상수(Quadratic Mechanical Coefficient)

이러한 관계식으로부터 유도 전동기의 속도는 기계-전기 커플링에 의해 주어진다.

$$\omega_m = \left[\frac{\omega_0}{V_R^2} \right] [1 - LF(A\omega_m^2 + B\omega_m^3)] \quad (4)$$

따라서 유도전동기의 해석을 위해서는 일반적인 전력 조류 계산 방법 외에도 기계-전기적인 커플링으로부터 수령의 부가적인 과정만이 필요한데 이는 회전체의 기계적인 회전과 에너지가 투입 전압과 주파수에 의존하기 때문이다.

2.3 종합 부하 모델

본 연구에서 제안한 부하모델은 정태 및 동태 부하가 결합된 형태이다. 정태 모델과 동태 모델은 각각 3.1과 3.2절에서 제안한 형태이며, 부하에서 이들이 차지하는 구성비에 의해 종합적인 부하모델을 구할 수 있다. 식 (5)는 이와 같은 수식을 보인다.

$$\begin{aligned} P_S^{model}(V_S, f, X) &= C_D P_S^D + C_S P_S^S \\ Q_S^{model}(V_S, f, X) &= C_D Q_S^D + C_S Q_S^S \end{aligned} \quad (5)$$

여기서, P_S^D, Q_S^D : 동태 부하의 유 · 무효 전력

P_S^S, Q_S^S : 정태 부하의 유 · 무효 전력

V_S : 시스템 전압 [p.u]

f : 주파수 [p.u]

X : 종합 부하모델 파라미터

C_D : 동태 부하 구성비

C_S : 정태 부하 구성비

3. 파라미터 식별법에 의한 종합 부하 모델링

종합 부하모델은 기술하였듯이 정태 및 동태 부하 모델링의 구성비에 의한 합으로 표현되며, 이는 순환 최소 자승법과 패턴검색법을 이용하여 구할 수 있다.

3.1 순환 최소 자승법(Recursive Least Square Method)

순환 최소자승법은 메모리 사용의 최소화 및 실시간 알고리즘에 적용이 가능한 장점을 가지고 있으며, 그 수식표현은 다음과 같다.

$$Y_N = A_N X_N + E_N \quad (6)$$

여기서, Y_N : 측정 벡터

X_N : 파라미터 벡터

A_N : 모델 매트릭스

E_N : 에러 벡터

위와 같은 수식으로 순환 최소자승법이 적용되며, 다음 식 (7)과 같은 관계가 필요하다.

$$P_N = (A_N^T A_N)^{-1} \quad (7a)$$

$$K_{N+1} = P_N A_{N+1}^T (I + A_{N+1} P_N A_{N+1})^{-1} \quad (7b)$$

$$X_{N+1} = X_N + K_{N+1} (Y_{N+1} - A_{N+1} X_N) \quad (7c)$$

여기서, K : 게인(gain) 매트릭스

N : 식별 단계

3.2 패턴 검색법

패턴 검색법은 최적화 기법중 하나로 미지수 추정에 매우 광범위하게 사용되어진다. 부하모델링을 위한 목적 함수는 측정데이터와 모델링 추정값간 차의 최소화이다.

$$J = \sum_{i=1}^n [(P_{S,i}^{model}(X) - P_{S,i}^{mes})^2 + (Q_{S,i}^{model}(X) - Q_{S,i}^{mes})^2] \quad (8)$$

여기서, $P_{S,i}^{model}$: 유효전력의 추정값

QS_i^{model} : 무효전력의 추정값

X : 파라미터

$P_{S,i}^{mes}$: 유효 전력의 측정값

$Q_{S,i}^{mes}$: 무효 전력의 측정값

n : 측정 데이터 개수

3.3 파라미터 식별법의 흐름

파라미터 식별법에 의한 전기차 부하 모델링의 흐름은 그림 3에 제시되고 있다.

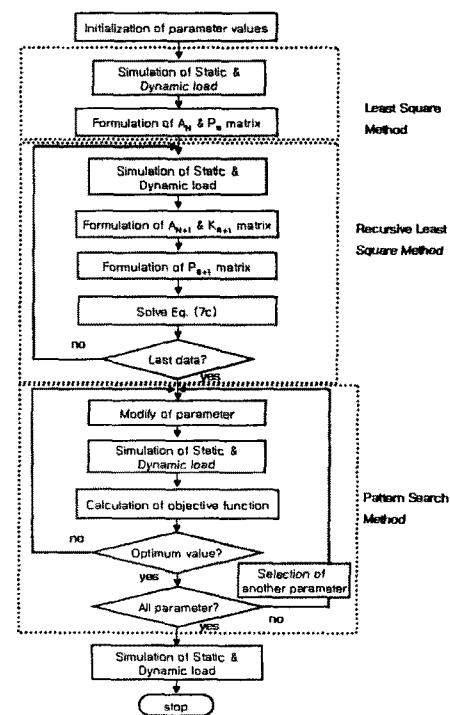


그림 3. 파라미터 식별의 순서도

4. 사례 연구

본 연구에서 제안한 KTX 전기차에 대한 정태 및 동태 부하가 결합된 전기차 부하모델링의 알고리즘의 적정성을 검토하기 위하여 다음과 같이 현장에서의 측정을 통한 부하모델을 검토하였다.

4.1 현장측정

본 연구에서 제시한 알고리즘을 이용하여 부하모델을 수립하기 위해서는 실제로 측정한 데이터가 필요하다. 필요한 데이터는 차량에 인가되는 가선전압, 주파수, 유·무효 전력 및 속도 등이다. 전압을 포함한 각종 전기량은 Reliable Power Meter社의 전력분석기를 통하여 얻었으며, 속도의 경우 속도 센서로부터 DAQ시스템을 이용하여 얻었다.

4.2 데이터 분류

전기차는 이동 및 정지를 반복하는 전기부하로서 가속 및 감속 상태에 따라서 매우 다른 특성을 나타낸다. 따라서 일률적인 부하모델의 수립은 현실적으로 불가능하며, 가속 및 감속 상태를 분류하여 각각의 부하모델을 수립한다. 데이터의 분류는 측정된 속도의 크기를 통하여 분류하였다.

4.3 모델링 결과

전기차가 기동을 시작하여 에너지를 소비하면서 속도를 증가시키는 단계가 가속상태이며, 정지를 위하여 속도를 줄이는 단계가 감속상태이다. 그림 4에는 가속상태에서 측정된 전압과 주파수의 변화를 보여주고 있으며, 그림 5와 6은 유효전력과 무효전력의 실측값과 모델링의 결과를 비교한 것이다.

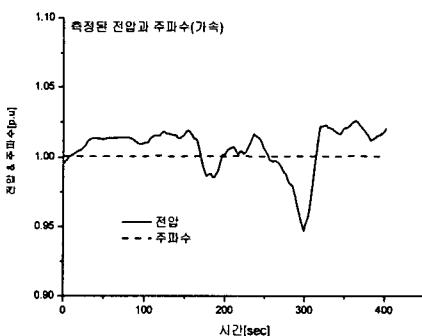


그림 4 측정된 전압 및 주파수(가속상태)

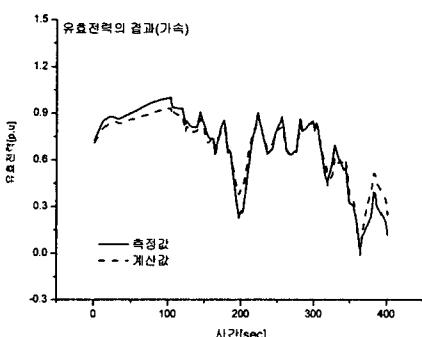


그림 5 유효전력의 비교(가속상태)

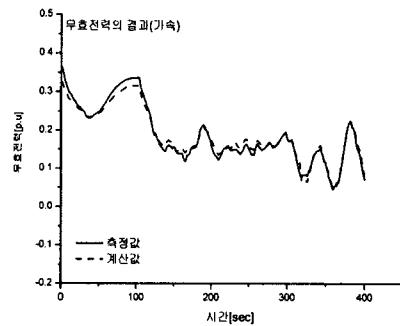


그림 6 무효전력의 비교(가속상태)

그림에서 보는 바와 같이 본 연구에서 제안한 KTX 전기차의 종합 부하모델링의 결과는 유효전력과 무효전력에서 실측값과 계산값의 오차가 매우 적어서 보하모델링의 결과가 양호한 것으로 판단된다.

5. 결 론

본 연구는 KTX 전기차에 적용할 수 있는 부하모델링의 새로운 방법을 제안하였다. 제안한 모델링은 전기차의 부하를 정태 및 동태 성분으로 구성되는 종합부하의 형태로 정식화 하였다.

종합 부하모델은 정태 및 동태 부하의 구성비의 합으로 표현되며, 정태 부하 모델은 전압과 주파수 변화에 따른 5차 다항식 모델로, 동태 부하의 경우 유도전동기 모델로 정식화 하였다. 또한 전체 부하에서 정태 성분과 동태 성분을 분류하기 위하여 순환 최소자승법과 패턴 검색법을 이용한 파라미터 셀프리피팅법을 사용하였다.

제안한 방법은 현재 경부고속철도구간에서 운행중인 KTX 열차에 적용하여 그 적정성을 입증하였으며, 모델링을 위한 데이터는 현장 실측을 통하여 수집되었다.

앞으로 KTX 전기차에 대한 부하모델링에 대한 연구가 더욱더 진행이 되고, 전기철도 급전시스템의 해석에서 개발된 부하모델을 적용하기 위한 본격적인 연구가 필요한 것으로 판단된다.

[참 고 문 헌]

- [1] EPRI, Determining Load Characteristics for Transient Performances, EPRI Report EL 849 prepared by U.T.A, G.E. and IREQ, 1979.
- [2] Ma Da-Qing, Ju Ping, "A Novel Approach to Dynamic Load Modeling", IEEE PES Summer Meeting 1988, Paper 88SM647-4, 1988.
- [3] R. Hooke, T. A. Jeeves, "Direct Search Solution of Numerical and Statistical Problems", Journal Assoc. Comp. Mach., Vol. 8, pp 212~229, 1994.
- [4] L. Ljung, T. Soderstrom, Theory and Practice of Recursive Identification, MIT Press, 1987.
- [5] B. Y. Lee, K. B. Shim and J. H. Kim, "A flexible Load Modeling by Parameter Identification of Equivalent Induction Motor", IEE of Japan Power & Energy '94, pp. 59~63, 1994.
- [6] K. B. Shim, B. Y. Lee, "Parameter Identification of Universal Load Modeling", ICEE '95, pp. 143~146, 1995.