

고속전철용 견인전동기 제어

전정우, 박정우, 임근희, 김용주
한국전기연구소

Traction Motor Controls for High Speed Railway System

J.W.Jeon, J.W.Park, K.H.Lim, Y.J.Kim
Korea Electrotechnology Research Institute

Abstract - The dynamics of the interaction between the wheel and rail must be considered when investigating the application of control strategy to a traction motor for high speed railway system. So this paper describes a dynamics model of the wheel rail adhesion characteristics and simple adhesion control strategy. Simulations are performed on the model of korea-high speed railway system using SIMULINK. With simple adhesion control strategy advanced characteristics of the system is showed in aspects of driveability.

1. 서 론

고속전철의 추진제어를 고려할 때 반드시 연구되어야만 하는 것중의 하나로 바퀴와 레일사이의 동적 특성에 관한 것이 있다. 열차가 추진하기 위해서는 바퀴와 레일 사이에 점착이라는 현상이 발생되어야 하며, 이것에 의해 앞으로 전진하는 힘을 얻게 된다. 하지만 전동기 측에서 보면 점착현상은 부하로서 보여진다. 다시 말하면 열차의 동특성과 바퀴의 동특성을 연결해 주는 결합력이라 할 수 있다. 점착에 영향을 주는 요소로는 많은 것들이 있지만 본 논문에서는 슬립과 차량속도에 의한 영향만을 고려하였다. 정상상태에서는 모든 힘은 균형을 이루고 있기 때문에 바퀴와 열차 모두 순수한 가속은 존재하지 않는다. 하지만 가속상태에서는 열차와 바퀴를 가속시키도록 하는 힘에 의하여 불평형적인 동특성이 존재하게 된다. 만일 바퀴의 속도가 급격히 증가하게 되면 슬립이 커져서 점착력이 감소하는 불안정영역으로 진행하게 되며, 이는 열차의 성능을 저하시키는 요인이 된다. 본 논문에서는 바퀴 및 차량의 동적 모델을 구성하고 점착현상을 모의하여 가속상태에서의 불평형적인 동특성이 있음을 보이고, 속도제어는 물론 점착제어를 함으로써 불평형적인 동특성이 개선됨을 보였다⁽¹⁾.

2. 본 론

2.1 고속전철 시스템의 기본 사양

고속전철의 주행중 슬립현상을 좀더 실제와 비슷하게 모의하기 위해 한국형 고속전철의 기본사양중 모의에 필요한 사양만을 간략히 요약하면 다음과 같다⁽²⁾.

- 차량편성 : 2P+4M+16T
- 열차중량 : 780ton
- 최대축중 : 17ton
- 최대운행속도 : 350 km/h
- 주행저항 : 131.4kN (350 km/h)
- 이용점착계수: 0.25(0km/h) - 0.07(350km/h)
- 전체축수 : 48개

동력전달축수 : 8개

위의 사양을 토대로 슬립현상 모의를 위한 전체 모델링은 모터 2대, 동력전달 1축, 바퀴 2개로 하였다.

2.2 바퀴와 레일의 상호작용

열차에서의 추진은 바퀴와 레일 사이의 점착이라는 현상에 의해 이루어진다. 점착이란 미끌림이 없이 접촉을 유지하면서 최대의 견인력을 발휘할 수 있는 바퀴의 능력을 말한다. 점착력은 식(1)과 같다.

$$F_d = \mu \times M_w \times g \quad (1)$$

여기서 μ : 점착계수

M_w : 축중 [kg]

g : 중력가속도 (=9.8 [m/s^2])

점착에 영향을 주는 요소로는 레일의 오염, 구름저항.

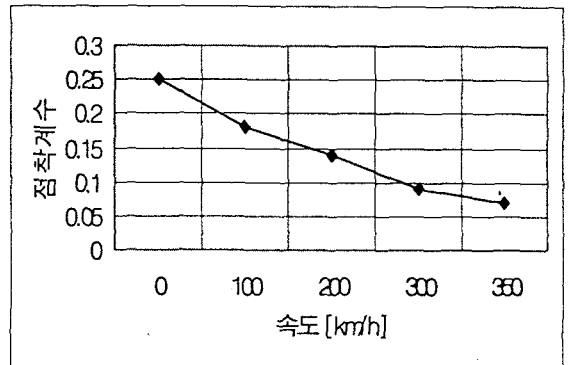


그림 1. 속도(km/h)에 대한 점착계수 특성

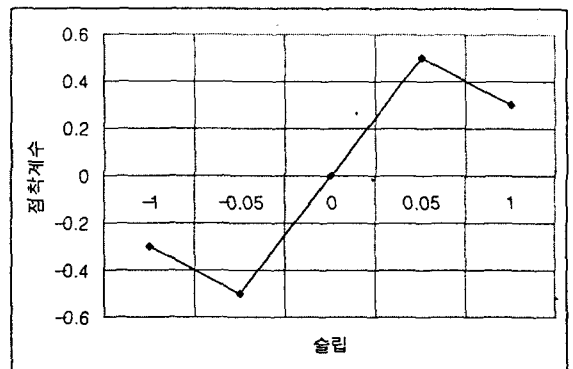


그림 2. 슬립에 대한 점착계수 특성

creep, 슬립 그리고 차량속도 등이 있다. 그 중에서도 본 논문은 슬립과 차량속도에 의한 영향을 우선적으로 고려하였다. 그림 1과 그림 2에 각각 슬립과 차량속도에 따른 점착계수 특성을 보였다^[3]. 여기서 그림 1은 현재 고려중인 고속전철 시스템의 기본 사양을 기준으로 하였으며, 그림 2는 TGV-Korea 실험 데이터를 기준으로 하였다. 최대 추진력은 일반 철도차량관련 레일에서는 슬립이 4~5[%]일 때 발생하며 여기서는 5[%]로 하였다. 0~5[%]사이의 슬립 증가에 따라 점착계수 증가하는 안정영역이며, 5~100[%]사이의 슬립 증가에 따라 점착계수가 감소하는 불안정영역이라 한다. 실제와 비슷하게 모의하기 위해 그림 1과 그림 2의 특성을 곱하면 된다.

2.3 바퀴 모델

바퀴에 전달된 전동기 토크를 T , 부하토크를 T_w , 점착에 의한 토크를 T_d , 그리고 바퀴의 각속도를 ω_w 라 두면, 바퀴의 동적 모델은 식(2)와 같이 표현된다.

$$T = J \frac{d\omega_w}{dt} + T_d + T_w \quad (2)$$

여기서 J : 축, 기어 그리고 바퀴의 전체계통 동가관성

식(2)로부터 바퀴의 각속도에 대하여 정리하면 식(3)과 같이 표현된다.

$$\omega_w = \int \frac{(T - T_d - T_w)}{J} dt \quad (3)$$

여기서 T_d 는 식(1)에서 구한 점착력 F_d 에 바퀴반경 r 을 곱하여 구한다. 식(3)에서 구한 바퀴 각속도는 실제 열차 속도와 비교하기 위해 선속도로 바꿀 필요가 있으며, 바퀴 중심에서의 선속도 V_w 는 식(4)와 같이 표현된다.

$$V_w = r \times \omega_w \quad (4)$$

2.4 열차 모델

바퀴의 점착에 의해 발생된 점착력이 바로 열차 추진에 필요한 견인력 F_d 가 되며, 열차의 총 질량을 M , 열차의 주행 저항을 F_r , 그리고 열차 속도를 V 라 하면 식(5)와 같이 표현된다.

$$M \frac{dV}{dt} = F_d - F_r \quad (5)$$

열차속도를 얻기 위하여 식(5)를 정리하면 식(6)과 같

이 표현된다.

$$V = \int \frac{(F_d - F_r)}{M} dt \quad (6)$$

2.5 슬립모의

바퀴와 차량의 상대적인 속도차이를 슬립이라 한다. 바퀴속도가 차량속도보다 크면 식(7)을 적용하고, 차량속도가 바퀴속도보다 크면 식(8)을 적용하여 슬립을 각각 구한다. 이렇게 구해진 슬립은 그림 2를 통해 점착계수를 구하게 된다.

$$S = \frac{V_w - V}{V_w} \quad (V_w \geq V) \quad (7)$$

$$S = \frac{V_w - V}{V} \quad (V_w < V) \quad (8)$$

2.6 주행저항

열차 주행시 차량속도에 따른 공기 및 기계적인 저항이 발생한다. 20량 편성일 때 실제와 비슷하게 모의하기 위해 현재 고려되고 있는 주행저항은 식(9)에 의해 구해진다^[4].

$$F_r = 0.77\sqrt{10nM} + 0.008MV + (0.02225 + 0.00352N)V^2 [M] \quad (9)$$

여기서 n : 축수, M : 총중량 [톤]

N : 동력객차를 포함한 객차 수

V : 열차 속도 [km/h]

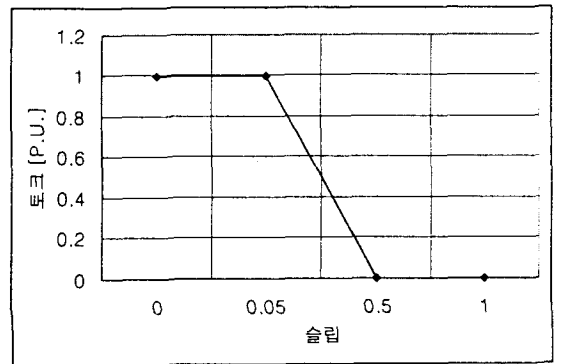


그림 3. 슬립에 따른 출력토크 제어

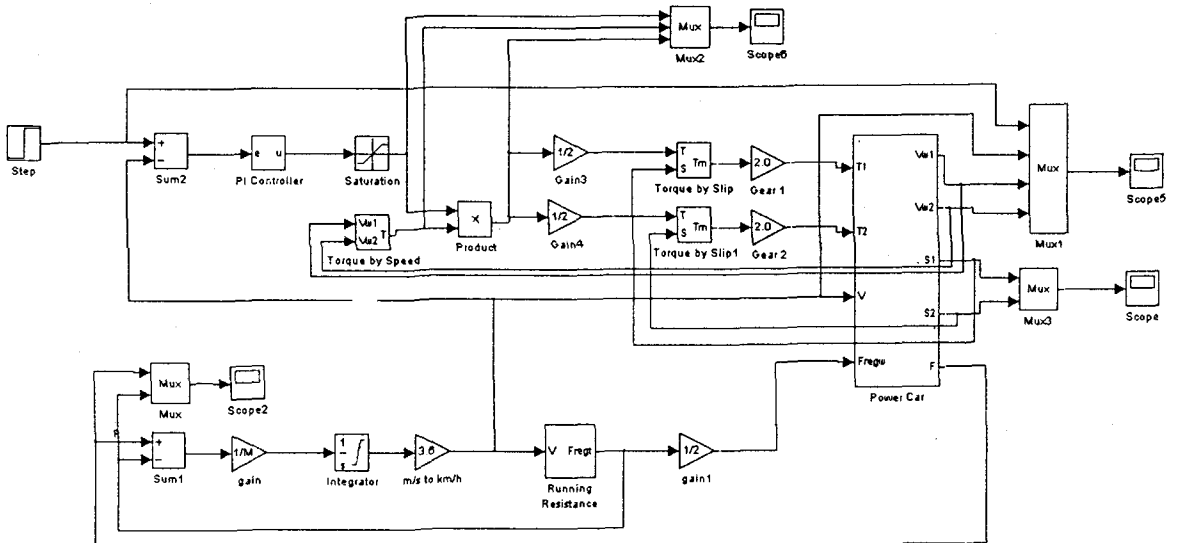


그림 4. 고속전철 시스템의 점착제어 구성도

2.7 속도제어

속도지령에 따라 부담해야 하는 전동기 출력을 만들어 주기 위해 간단히 PI 제어를 사용하였다. 그리고 전동기 출력단에 속도에 따른 토크 제한치를 주어 실제와 비슷한 제원을 낼 수 있도록 모의하였다.

2.8 점착제어

그림 2에서와 같이 슬립에 따라 안정영역과 불안정영역이 발생하며, 속도제어만을 통한 열차 제어시 슬립이 불안정영역으로 되면 바퀴의 점착력이 떨어져 지령속도 증가시 오히려 열차속도 증가정도가 감소하며 제어기의 출력이 더욱 커져 슬립 현상을 가속화시키는 불안정한 상태가 된다. 이런 불안정한 상태를 막기 위해 슬립의 정도를 파악하여 항상 안정영역에서 운전할 수 있도록 해 주어야 한다. 본 논문에서는 그림 3과 같이 슬립에 따라 바퀴에 전달된 토크를 낮추어서 다시 점착이 회복될 수 있도록 하였다.

2.9 모의실험

전체적인 구성 및 시뮬레이션은 simulink를 이용하여 모의실험을 실시하였으며, 그림 4에 나타내었다. 본 논문에서는 2대의 전동기로 2개의 바퀴를 구동하는 것으로 가정하였다. 시뮬레이션에 사용된 파라미터를 표 1에 보였다.

표 1. 시뮬레이션에 사용된 파라미터

	내 용	값[단위]	
J	관성모멘트	26,630 [kgm ²]	바퀴 1 개
M	열차 총질량	780 [Ton]	20 량
M_w	축중	17 [Ton]	20 량
n	축수	48	
N	객차수	18	동력객차 포함
r	바퀴반경	0.885 [m]	

2.10 모의실험 결과

그림 5 A의 경우 바퀴 1과 바퀴 2의 점착계수가 일정하고, $K_p=0.002$, $K_i=9 \times 10^{-7}$ 일 때 속도제어에 의한 바퀴 및 차량속도를 나타내고 있다. 그림 5 B의 경우 A의 경우와 같은 PI 이득에서 바퀴 1의 노면상태 불량으로 점착계수가 감소했을 경우를 나타내고 있으며 바퀴 1의 속도가 급격히 증가하여 불안정영역으로 진행함을 볼 수 있다. 그림 6 A는 그림 5 B의 경우에서 속도제어는 물론 점착제어를 했을 경우를 나타내고 있는데, 바퀴 1의 속도 상승이 급격히 줄어들었음을 볼 수 있다. 이것은 불안정영역에 놓인 점착계수를 그림 3의 점착제어 특성곡선을 이용하여 안정영역으로 이동하도록 하였음을 알 수 있다. 그림 6 B는 그림 6 A에서 PI 이득을 $K_p=0.004$, $K_i=1.5 \times 10^{-6}$ 로 개선했을 경우의 바퀴 및 차량속도를 나타내고 있다. 여기서 정상상태로 도달되는 정도는 속도제어 및 점착제어를 함께 사용한 경우가 속도제어만을 했을 경우보다 약 50%의 향상을 보이고 있으며, 바퀴 1의 점착력이 회복되고 있음을 알 수 있다.

3. 결 론

고속전철 추진을 위해 바퀴 및 열차의 동적 모델을 구하였으며, 바퀴와 레이스이의 점착현상은 연구개발중인 한국형 고속전철 데이터를 이용하여 모의하였다. Simulink를 이용하여 시뮬레이션을 수행하였고, 각종 파라미터 값은 고속전철 시스템 기본사양의 내용을 인용하여 결정하였다. 우선 속도제어만을 했을 경우의 바퀴와 차량속도와의 관계를 구했으며, 노면상태에 따른

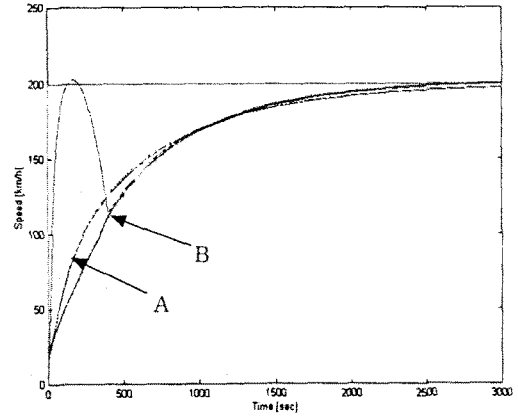


그림 5. 바퀴 및 차량속도 (속도제어)

좌우 레일의 점착계수 50(%) 불균일 조건

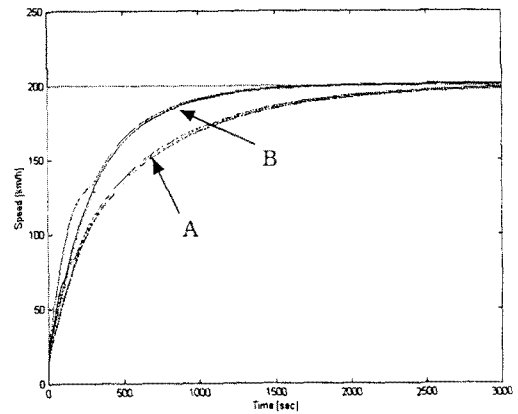


그림 6. 바퀴 및 차량속도 (속도제어+점착제어)

좌우 레일의 점착계수 50(%) 불균일 조건

점착특성을 나타내기 위해 한쪽 바퀴의 점착특성을 달리 주어 바퀴와 차량속도와의 관계를 보였다. 속도제어만으로는 슬립에 따른 바퀴속도의 불평형을 회복하는데 어려움이 있는 것으로 나타나고 있다. 그래서 속도제어에 점착제어를 더하여 좀더 빠르게 바퀴속도의 불평형을 회복하도록 하였으며, 속도제어만을 고려했을 때보다 가속성능이 약 50% 향상됨을 보여주었다. 그러므로 가속 상태에서 슬립에 따른 불평형을 회복하는데 점착제어가 반드시 필요함을 알 수 있었다. 향후 바퀴와 차량 모델 그리고 점착계수 등을 좀더 정밀하게 모델링한 후 점착계수를 최대로 쓸 수 있도록 최대 점착력 제어 기법에 대하여 연구할 계획이다.

[참고 문헌]

- (1) Steven Senini, Frank Flinders and Wardina Oghanna, "Dynamic Simulation of Wheel-Rail Interaction for Locomotive Traciton Studies", 1993 Joint ASME/IEEE Railroad Conference, pp 27-34
- (2) 한국철도기술연구원, "고속전철시스템 기본사양", 1998.3.
- (3) 한국전기연구소, "비접촉제동시스템 개발 1차년도 보고서", 1997.11.
- (4) 대우중공업, "동력차 시스템 엔지니어링 기술개발 1차년도 보고서", 1997. 10.