

점착력 추정에 의한 최대 견인력 제어에 관한 연구

전기영*, 정정훈*, 김성남*, 이승환**, 오봉환***, 이훈구****, 김용주****, 한경희*
 *명지대학교, **대덕대학, ***명지전문대학, ****용인송담대학, *****동양공업전문대학

A Study on Maximum Traction Effort Control with the Adhesive Effort Estimation

K.Y. Jun*, J.H. Chung*, S.N. Kim*, S.H. Lee**, B.H. Oh***, H.G. Lee****, Y.J. Kim****, K.H. Han*

*Myongji Univ., **Taedok College, ***Myongji College, ****Yong-in Songdam College, *****Dong Yang Tech. College

Abstract -In electric motor coaches, the rolling stocks move by the adhesive effort between rail and driving wheel. Generally, the adhesive effort is defined by the function of both the weight of electric motor coach and the adhesive effort between rails and driving wheel. The characteristics of adhesive effort is strongly affected by the conditions between rails and driving wheel. When the adhesive effort decreases suddenly, the electric motor coach has slip phenomena. This paper proposes a re-adhesion control algorithm which uses the maximum adhesive effort by instantaneous estimation of adhesion force using disturbance observer. Based on this estimated adhesive effort, the re-adhesion control is performed to obtain the maximum transfer of the tractive effort.

력이 발생하기 때문에, 점착력 이상의 구동력은 공전을 발생시킨다. 공전이 발생하면, 바퀴와 레일사이의 점착력이 감소하여 견인력은 현저히 감소하게 된다. 그러므로 본 논문에서는 전동차의 공전현상을 간단하게 분석하기 위해서 1C1M(1-Controller 1-Motor)에 의해 구동되는 한 개의 바퀴에 대하여 모델링 하였다.

1. 서 론

철도차량은 레일과 바퀴사이의 마찰로서 견인력을 전달하므로 점착력 이상의 구동력은 공전(slip)을 발생시킨다. 일반적으로, 점착력은 전동차의 무게와 레일-바퀴간의 점착력 계수의 함수로 정의 되어진다. 점착력 계수의 특성은 레일위의 습기, 먼지, 기름등과 같은 레일과 바퀴사이의 조건에 크게 영향을 받는다. 점착력 계수가 갑자기 감소하면 점착력 이상의 구동력으로 공전이 발생한다. 공전이 발생하면, 점착력을 저하시켜 견인능력을 감소시키고, 기계적 손상 및 소음을 유발시킨다. 그러므로 공전을 방지하기 위해서는 마찰력에 의한 견인력 제한치인 최대점착력을 충분히 활용할 수 있는 견인력제어 방법이 필요하다. 그러나 이와 같은 견인력 제어를 위해서는 점착력 계수를 필요로 하는데, 점착력 계수를 검출할 수 있는 방법이 없다.

그러므로 본 논문에서는 최대 견인력 제어를 위해서 최소 차원 부하 토오크 외란 관측기를 이용하여 점착력 계수를 추정하고 추정된 점착력 계수의 미분치를 PI 토오크 제어하는 Anti-slip제어를 제안한다. 최소차원 부하 토오크 외란 관측기는 회전자의 위치 정보와 토오크 전류의 정보를 이용하여 부하 외란토오크를 추정하고, 부하 외란 토오크에 철도차량 상수를 이용하여 점착력 계수를 추정한다. 또한 외란 관측기는 구조가 간단하며, 외란 토오크와 상태변수 변화에 대하여 견실하게 동작한다. 이와같은 시스템의 모델링과 전동기 토오크에 대한 회전자의 위치 정보를 이용하여 최소차원 부하 토오크 외란 관측기의 상태변수인 점착력 계수를 추정하고, 추정된 점착력 계수의 미분치를 토오크 제어하여, 최대 견인력 제어가 되도록 하였다.^[1-2]

2. 철도 차량시스템의 모델링

2.1 전동차의 공전(Slip)현상

전기철도차량 시스템은 5M5T(5 Motor Cars and 5 Trailer Cars)로 구성된다. 본 논문에서는 전동차의 견인력제어 시스템을 모델링하고, Anti-slip 제어시스템을 구성하였다. 전동차는 바퀴-레일간의 점착력에 의해 견인

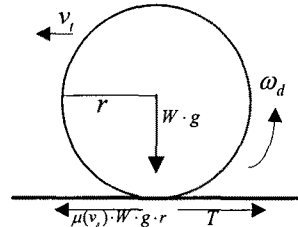


그림 1 바퀴-레일사이의 점착특성

그림 1은 바퀴와 레일사이의 점착특성을 간략하게 구성하였다. 전동차의 운동방정식은 식 (1)~(2)와 같이 표현된다. 식 (1)은 전동차의 견인력에 대한 동작을 나타내고, 식 (2)는 전동차 바퀴의 동작을 나타낸다. 식 (2)에서 $\mu(v_s)Wgr$ 은 레일-바퀴간의 점착력 $\mu(v_s)Wg$ 와 상응하는 바퀴의 토오크이다.^[3-4]

$$M \cdot \frac{d}{dt} v_t = \mu(v_s) \cdot W \cdot g \cdot r - F_d(v_t) \tag{1}$$

$$J \cdot \frac{d}{dt} \omega_d = T - \mu(v_s) \cdot W \cdot g \cdot r \tag{2}$$

$$v_s = v_d - v_t \tag{3}$$

여기서, v_t 는 전동차의 속도, v_s 는 슬립속도, v_d 는 바퀴의 속도, ω_d 는 바퀴의 선속도, $\mu(v_s)$ 는 레일-바퀴간의 점착력 계수이다. W 는 전동차의 무게, M 은 바퀴에 가해지는 무게, J 는 바퀴의 전체 관성모멘트, T 는 바퀴의 구동토오크, $F_d(v_t)$ 는 전동차의 주행저항, g 는 중력 가속도, r 은 바퀴의 반지름이다.

바퀴와 전동기 사이의 수식은 식 (4)~(6)에 의해 표현된다. 식 (4)~(6)을 식 (2)에 대입하면, 식 (2)는 식 (7)과 같이 표현된다.

$$v_d = \omega_d \cdot r \tag{4}$$

$$M_j = J / r^2 \tag{5}$$

$$F_t = T / r \tag{6}$$

$$M_j \cdot \frac{d}{dt} v_d = F_t - \mu(v_s) \cdot W \cdot g \tag{7}$$

바퀴-전동기 사이의 또 다른 관계식은 식 (8), (9), (10)과 같이 표현한다. 여기서, T_m 은 전동기의 토오크, ω_m 은 전동기의 회전각속도, J_m 은 전동기의 관성모멘트, R_g 는 기어비이다.

$$T = T_m \cdot R_g \quad (8)$$

$$\omega_m = R_g \cdot \omega_d \quad (9)$$

$$J_m = \frac{J}{R_g^2} \quad (10)$$

식 (1)~(10)의 수식으로부터 전동차의 공전현상에 대한 블록도를 그림 2와 같이 표현된다.^[11]

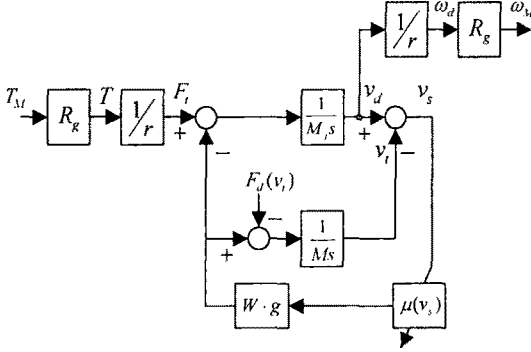


그림 2 전동차의 공전현상 블록도

2.2 점착력 계수 추정 시스템

식 (11)은 일반적인 전동기의 토오크 방정식으로서 전동기의 회전각속도에 대한 일차 미분방정식의 형태로 표현된다. T_L 은 전동기의 부하 외란 토오크이며, 외란 관

측기에 의해서 추정한다. 최근에는 고성능 토오크제어가 가능하므로, 외란 관측기는 산업 현장의 드라이브 시스템에서 종종 이용되고 있다.

$$J_m \frac{d}{dt} \omega_m = T_m - T_L \quad (11)$$

식 (8), (9), (10)을 식 (2)에 대입하면, 식 (12)와 같은 수식을 얻을 수 있다. 식 (12)에서 $\frac{1}{R_g} \mu(v_s) W g r$ 은 전동기의 외란토오크로서, 레일-바퀴간의 점착도오크에 상응하는 전동기의 토오크가 된다. 그러므로, 식 (14)에서 보이는 것처럼 간단하게 구성된 외란 관측기에 의해서 외란 토오크를 추정할 수 있다. 또한, 레일-바퀴 사이의 점착력계수 $\mu(v_s)$ 는 식 (15)에서처럼 외란도오크 \hat{T}_L 을 사용하여 계산된다. a 는 임의로 결정한 외란 관측기의 극점이다. 그림 3은 제안된 외란관측기에 의한 점착력계수의 추정 블록도를 나타낸다.^[11]

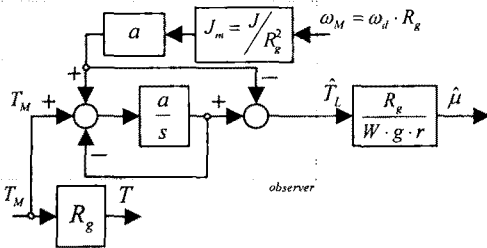


그림 3 점착력 계수 추정 블록도

$$J_m \frac{d}{dt} \omega_m = T_m - \frac{1}{R_g} \mu(v_s) \cdot W \cdot g \cdot r \quad (12)$$

$$T_L = \frac{1}{R_g} \mu(v_s) \cdot W \cdot g \cdot r \quad (13)$$

$$\hat{T}_L = \frac{a}{J_m s + a} \cdot (T_m - J_m \cdot s \cdot \omega_m) \quad (14)$$

$$\hat{\mu}(v_s) = \frac{R_g}{W \cdot g \cdot r} \hat{T}_L \quad (15)$$

2.3 Anti-Slip 제어 시스템

일반적으로, 점착력 $\mu(v_s)Wg$ 와 공전속도 v_s 간의 특성 곡선은 그림 4와 같이 표현된다. 점착력의 최대값을 최대점착력이라고 하고, 최대점착력계수 $\mu(v_s)_{max}$ 의 상태에서 생긴다. 전동차의 구동토크가 최대값이 되었을 때, 전동기는 공전이 발생한다.

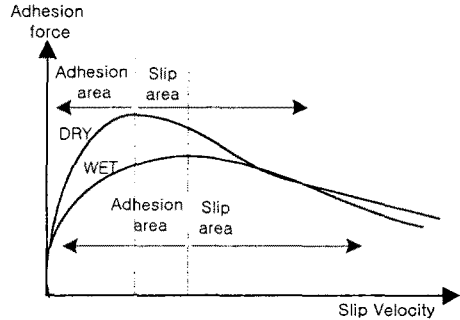


그림 4 점착력과 공전속도 사이의 특성곡선

Anti-Slip 제어는 최대 점착력에 일치하는 구동 토크를 유지 하도록 제어 한다. 그림 4에서처럼 최대점착력은 점착력과 공전속도 사이의 최대점착계수 $\mu(v_s)_{max}$ 의 조건에서 발생된다. 점착력이 최대값이 되었을 때, 점착력계수 $\mu(v_s)$ 또한 최대값이 된다. 결국, 식 (16)의 관계에서 구동 토크 T 는 최대점착력에서 구동하게 된다. 일반적으로, 전동차의 공전속도 v_s 는 매우 작고, 변화량 또한 매우 작다. 그러므로, 본 논문은 식 (17)의 조건 방정식으로부터 최대점착력을 추정한다.

$$\frac{d\mu}{dv_s} = 0 \quad (16)$$

$$\frac{dT}{dt} = 0 \quad (17)$$

그림 5는 최소차원 외란관측기를 이용한 Anti-slip 제어 시스템의 전체블록도를 나타낸다.^[11]

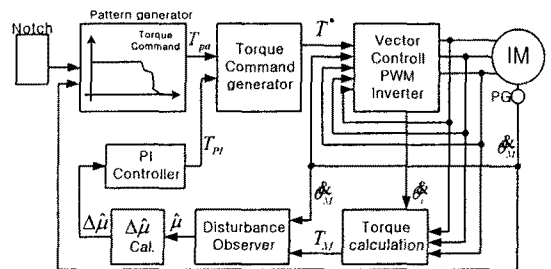


그림 5. 외란 관측기를 이용한 Anti-slip PI제어 시스템

PWM 인버터를 이용한 벡터제어 시스템에 의해 구동하는 유도 전동기는 빠른 토크 응답을 얻을 수 있다. 그러므로 그림 5와 같이 부하 외란 관측기에 의해 추정된 점착력 계수 $\hat{\mu}(v_s)$ 의 미분값을 PI 토크 제어한 Anti-slip 제어는 최대 점착력과 같은 구동 토크를 유지하므로 항상 최대 견인력으로 동작할 수 있다.^[1-2]

3. 시뮬레이션

실제 점착력 계수에 대한 추정 점착력의 특성을 확인하고, 점착력 계수 변화시 Anti-slip 제어의 특성을 확인하기 위해서 철도차량 시스템과 점착력 계수 추정 블록도를 그림 3, 4와 같이 모델링하여 시뮬레이션 하였다. 표 1은 시뮬레이션에 사용한 파라미터를 나타낸다.

표 1 시뮬레이션 파라미터

전동기 파라미터			
출 력	120[kW]	R_s	0.23[Ω]
정격 전압	380[V], 60[Hz]	L_s	50.26[mH]
정격토크	80[N·m]	L_r	52.103[mH]
정격회전수	1750[RPM]	L_m	50.26[mH]
R_r	0.18[Ω]	J_m	15.5[kg·m ²]
철도차량 파라미터			
R_x	5.64	g	9.8[m/sec ²]
r	0.43[m]	J	184.9[kg·m ²]
W	10000[kg]	M	21250[kg]

그림 6은 전동차 운전시, 부하 외란 관측기에 의한 점착력 계수 추정치 $\hat{\mu}(v_s)$ 가 실제 점착력 계수 $\mu(v_s)$ 를 정확히 추정함을 나타낸다. 그러나, Anti-slip 제어를 하지 않았으므로 공전발생시, 공전속도가 계속 증가함을 확인할 수 있다. 그림 7은 공전발생시, 점착력 계수의 변화에도 불구하고, 추정된 점착력 계수 $\hat{\mu}(v_s)$ 의 미분값을 PI 토크 제어한 Anti-slip 제어에 의하여 공전속도가 증가하지 않음을 확인할 수 있다. 또한, 구동 토크와 차량 속도의 변화가 일정한 것을 확인할 수 있다.

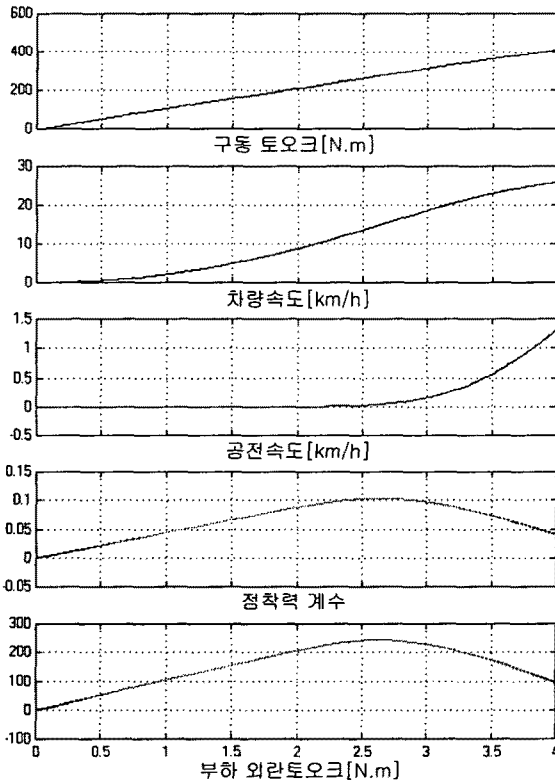


그림 6 Anti-slip 제어를 하지 않은 경우의 구동토크, 차량속도, 공전속도, 점착력계수, 부하외란토크의 파형

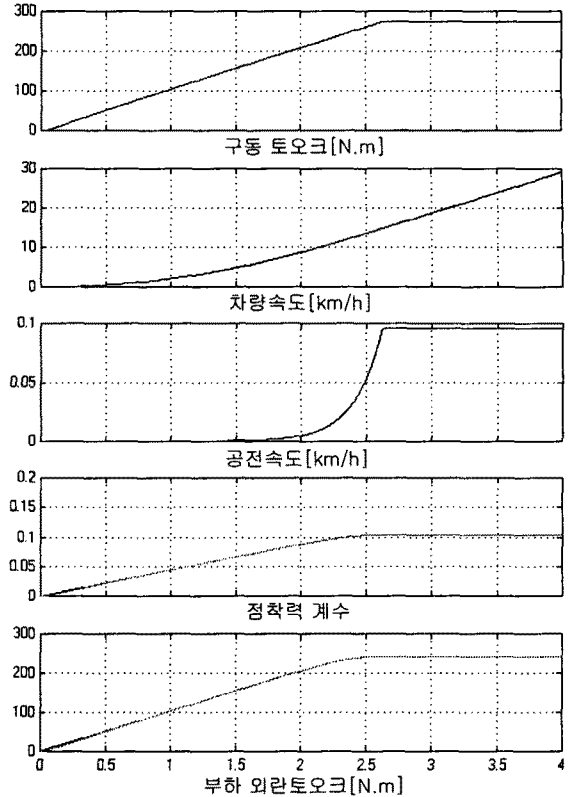


그림 7 Anti-slip 제어인 경우 구동토크, 차량속도, 공전속도, 점착력계수, 부하외란토크의 파형

4. 결 론

본 논문에서는 최소차원 부하 외란 관측기를 구성하여 점착력 계수를 추정하고, 추정된 점착력 계수의 미분치를 PI 토크 제어하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

- [1] 바퀴와 레일사이의 실제 점착력 계수를 부하 외란 관측기를 통하여 추정하고, 추정된 점착력 계수를 Anti-slip 제어 하여 최대견인력 제어가 되도록 하였다.
- [2] 관측기를 통하여 상태변수인 점착력 계수를 추정하므로 시스템의 외란 및 파라미터 설정에 대하여 안정적인 제어가 되도록 하였다.
- [3] 공전속도에 의한 점착력 계수의 변화에도 불구하고 구동 토크는 일정한 가속 토크 제어 가 가능하였다.

[참 고 문 헌]

- [1] Kiyosh Ohishi, Ken Nakano, Ichiro Miyashita and Shinobu Yasukawa, "Anti-Slip Control of Electric Motor Coach using Adhesion Force Coefficient Estimator Based on Disturbance Observer", JIASC98, Vol.1, pp.229-234, 1998
- [2] M.Iwahori, R.Inoue, "Anti-Slip Control of VVVF Inverter Driven EMUs", STECH, Vol.2, pp.255-260 November, 1993
- [3] Yoshiki Ishikawa, Atsuo Kawamura, "Maximum Adhesive Force Control in Super High-Speed Train", PCC-Nagaoka'97, pp.951-954, 1997
- [4] 서광덕, "점착력 추정에 의한 고능률 재점착제어", 서울대학교 대학원 공학박사 학위논문, pp.13-28, 1995