

철도차량의 최대견인력 제어를 위한 연구

(A Study on tractive effort controll for Railway Vehicle)

정 춘 병 · 김 대 군 · 함 년 근 · 이 상 칩 · 전 기 영 · 이 훈 구 · 한 경 희
 (Choon-Byeong Chung · Dae-Gun Kim · Nyun-Gun Hahm · Sang-Chip Lee
 · Kee-Young Jeon · Kyung-Hee Han)

Abstract

본 논문에서는 최대 견인력 제어를 위해서 최소 차원 부하 토크 외란 관측기를 이용하여 점착력 계수를 추정하고 추정된 점착력 계수의 미분치를 PI 토크 제어하는 Anti-slip제어를 제안한다. 최소차원 부하 토크 외란 관측기는 회전자의 위치 정보와 토크 전류의 정보를 이용하여 부하 외란토크를 추정하고, 부하 외란 토크에 철도차량 상수를 이용하여 점착력 계수를 추정한다. 또한 부하토크외란 관측기는 구조가 간단하며, 시스템의 외란 및 각종 제어이득, 시스템의 상수 변화에 대해서도 견실한 견인력 제어 특성을 가지고 있다. 이와같은 시스템의 모델링과 전동기 토크에 대한 회전자의 위치 정보를 이용하여 최소차원 부하 토크 외란 관측기의 상태변수인 점착력 계수를 추정하고, 추정된 점착력 계수의 미분치를 PI토크 Anti-Slip제어하여, 최대 견인력 제어가 되도록 하였다.

1. 서 론

철도차량은 레일과 바퀴사이의 마찰로서 견인력을 전달하므로 점착력 이상의 구동력은 공전(slip)을 발생시킨다. 일반적으로, 점착력은 전동차의 무게와 레일-바퀴 간의 점착력 계수의 함수로 정의 되어진다. 점착력 계수의 특성은 레일위의 습기, 먼지, 기름등과 같은 레일과 바퀴 사이의 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 검출 할 수 있는 방법이 없다.

그러므로 본 논문에서는 최대 견인력 제어를 위해서 최소 차원 부하 토크 외란 관측기를 이용하여 점착력 계수를 추정하고 추정된 점착력 계수의 미분치를 PI 토크 제어하는 Anti-slip제어를하여, 추정된 점착력이 최대점착력에서 유지되도록 전동기를 토크 제어한다.^{[1]-[2]} 최소차원 부하 토크 외란 관측기는 회전자의 위치 정보와 토크 전류의 정보를 이용하여 부하 외란토크를 추정하고, 부하 외란 토크에 철도차량 상수를 이용하여 점착력 계수를 추정한다. 이와 같은 알고리즘을 실제 철도차량 시스템에 적용하여 철도차량이 최대견인력에서 동작되도록 제어하였다.

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 견인력이 발생하기 때문에, 점착력 이상의 구동력은 공전을 발생시킨다. 공전이 발생하면, 바퀴와 레일사이의 점착력이 감소하여 견인력은 현저히 감소하게 된다. 그러므로 본 논문에서는 전동차의 공전현상을 분석하기 위해서 ICAM에 의해 구동되는 한 개의 바퀴에 대하여 모델링 하였다.

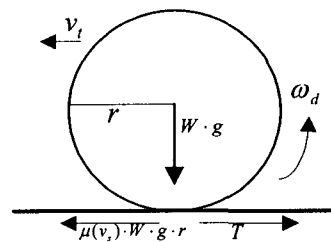


그림 1 바퀴-레일사이의 점착특성
 Fig. 1 Adhesion characteristics between wheel and rail

그림 1은 바퀴와 레일사이의 점착특성의 관계를 나타낸 것이다. 견인전동기에서 발생한 구동력은 기어와 차축을 통하여 차량바퀴에 전달된다. 전달된 견인전동기의 구동력은 차량바퀴와 레일사이의 점착력에 의해 차

량에 전달된다. 전동차의 운동방정식은 식 (1)과 같이 표현된다. 식 (1)은 전동차의 견인력에 대한 동작을 나타내고, 식 (2)는 전동차 바퀴 동작을 나타낸다. 식 (2)에서 $\mu(v_s)Wgr$ 은 레일-바퀴간의 점착력 $\mu(v_s)Wg$ 와 상응하는 바퀴의 토크이다.

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

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

$$F_{AE} = \mu(v_s) \cdot W \cdot g \quad (2)$$

$$v_s = v_d - v_t \quad (3)$$

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 구동토크, $F_d(v_t)$ 는 전동차의 주행저항, g 는 중력가속도, 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.

$$v_d = \omega_d \cdot r \quad (4)$$

$$M_j = J / r^2 \quad (5)$$

$$F_t = T / r \quad (6)$$

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

바퀴-전동기 사이의 또 다른 관계식은 식 (8), (9), (10)과 같이 표현한다. 여기서, T_m 은 전동기의 토크, 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 바퀴와 전동기 사이의 관계식이 성립한다.

2.2 점착력 계수 추정 시스템

식 (11)은 일반적인 전동기의 토크 방정식으로서 전동기의 회전각속도에 대한 일차 미분방정식의 형태로 표현된다. T_L 은 전동기의 부하 외란 토크이며, 외란 관측기에 의해서 추정한다. 최근에는 고성능 토크제어가 가능하므로, 부하 외란 관측기

는 산업 현장의 드라이브 시스템에서 널리 이용되고 있다.^[3]

$$J_m \frac{d}{dt} \omega_m = T_m - T_L$$

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

식 (8), (9), (10)을 식 (2)에 대입하면, 식 (12)와 같은 수식을 얻을 수 있다. 식 (12), (13)에서와 같이 $\frac{1}{R_g} \mu(v_s)Wgr$ 은 전동기의 외란토크로서, 레일-바퀴간의 점착토크에 상응하는 전동기의 부하 토크가 된다. 그러므로, 부하 토크 T_L 을 추정하기 위하여 다음과 같은 부하 토크외란 관측기를 적용한다.

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

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

실제 시스템에서 관측 주기는 T_L 의 변화에 비하여 충분히 짧기 때문에 관측기의 디자인을 간소화하기 위해서, 이것은 다음과 같은 가정이 가능하다.

$$\frac{dT_L}{dt} = 0 \quad (14)$$

식 (11)과 (14)을 토대로, 다음과 같은 상태방정식을 얻을 수 있다.

$$\dot{x} = \begin{pmatrix} 0 & -\frac{1}{J_m} \\ 0 & 0 \end{pmatrix} x + \begin{pmatrix} \frac{K_T}{J_m} \\ 0 \end{pmatrix} u$$

$$y = (1 \quad 0)x \quad (15)$$

여기에서,

$$x = (\omega_m, T_L)^T, \quad u = i_T, \quad y = \omega_m \text{ 이다.}$$

상태 방정식에 따라서, 이것은 Gopinath 디자인 방식을 이용하여 최소차원 관측기에 의해 추정될 수 있다.

$$\begin{aligned} \hat{T}_L &= \frac{1}{1 + \frac{J_m}{G} s} (K_T i_T - s J_m \omega_m) \\ &= \frac{1}{1 + \frac{J_m}{G} s} T_L \end{aligned} \quad (16)$$

여기서, $\frac{J_m}{G}$ 는 관측기 시정수이다.

DSP를 이용하는 실제 신호처리에서, 식 (16)의 부하

으로부터 최대점착력을 추정한다.

$$\frac{d\mu}{dv_s} = \frac{\frac{d\mu}{dt}}{\frac{dv_s}{dt}} = \frac{d\mu}{dt} \cdot \frac{dt}{dv_s} \quad (20)$$

$$\frac{d\mu}{dt} = 0 \quad (21)$$

그림 5는 부하토크 외란관측기를 이용한 Anti-slip PI토크제어시스템의 전체블록도를 나타낸다. PWM 인버터를 이용한 벡터제어 시스템에 의해 구동하는 유도전동기는 빠른 토크 응답을 얻을 수 있다. 그러므로 그림 4와 같이 부하토크 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.

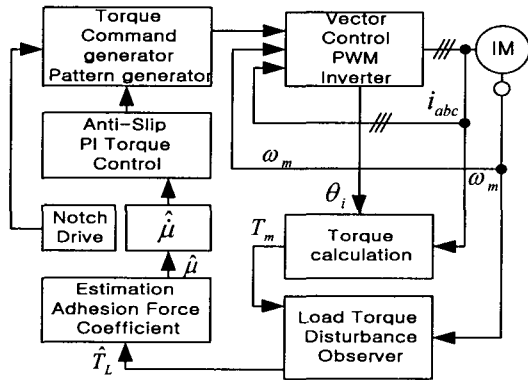


그림 5. 부하토크 외란 관측기를 이용한 Anti-slip PI 토크제어 시스템
Fig 5. Anti-slip PI torque control system with Load torque disturbance observer

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. 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.

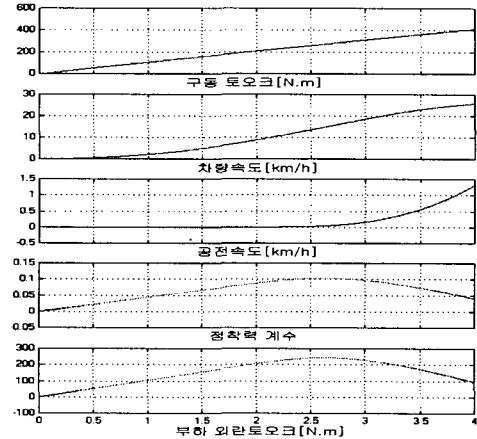


그림 6. Anti-Slip PI 토크 제어를 하지 않은 경우
Fig. 6. In case of non anti-slip PI torque control

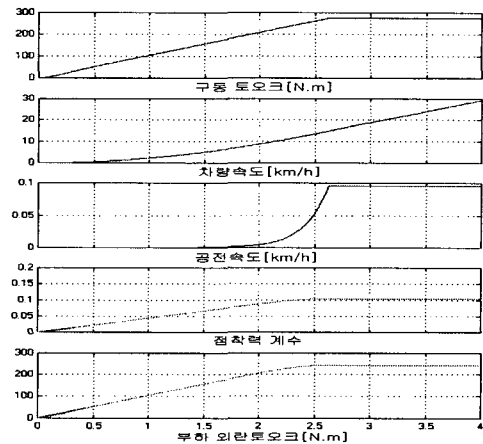


그림 7. Anti-Slip PI 토크 제어를 한 경우
Fig. 7. In case of Anti-Slip PI torque control

4. 실험 결과

유도전동기의 벡터제어방법은 회전자 자속기준 벡터제어를 이용하였으며, 전류제어루프는 200[μ S]마다 동작되도록 하였으며, 속도제어루프는 5[mS]마다 제어되도록 하고, 실험에 사용된 encoder는 1024[ppr]로 2채배하여 사용하였다. 실험 조건으로는, 초기 기동시 견인력 요구치의 증가에 따라 전동기 구동력과 바퀴속도가 증가하게 된다. 발생

된 구동력에 대해 추정 점착력도 증가한다. 이러한 견인력 제어상태에서 바퀴와 레일사이 에 물을 주입하여 마찰력을 감소시켰다. 그로 인해 바퀴는 비안정적인 공전속도를 가지게 되며, 견인력 제어는 비안정 영역에서 수행된다. 그러나 점착력의 감소를 추정한 점착력과 공전요소 제어에 의해 전동기 구동력이 빠르게 감소됨으로써, 바퀴의 공전속도는 비안정적인 공전상태에서 안정된 공전상태로 회복 제어된다.

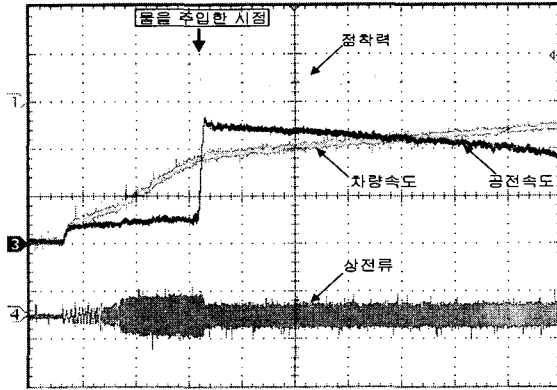


그림 8 Anti-slip 제어를 하지 않은 경우의 파형
Fig 8 Waveform of non anti-slip control
①점착력(100N/Div) ②차량속도(20km/h/Div)
③공전속도(1km/h/Div) ④상전류(20A/Div) Time Div: (2s)

그림 8은 notch1과 2로 기동토크를 주다가 물을 계속하여 주입한 경우의 점착력파형과, 공전속도, 차량속도, 상전류 파형을 나타내고 있다. 이 경우에는 Anti-slip PI토크제어를 하지 않은 경우로써, 정상상태로 운전하다가 물을 주입한 후 대공전이 발생하는 것을 확인할 수 있었다. 또한 차량속도의 증가 기울기가 현저히 감소하는 것을 확인할 수 있었다. 실제 철도차량시스템에서는 수직항력이 상당히 크기 때문에 이와 같은 대공전은 발생하지 않지만, 축소형 철도차량 장치에서는 수직항력이 약하고 전동기의 원반과 레일 마찰면의 마찰력이 약하므로 대공전이 발생한다.

그림 9는 그림 8과 같은 경우로써, 이 경우에는 Anti-Slip PI토크제어를 한 경우로써, 정상상태로 운전하다가 물을 주입하여도 Anti-Slip PI토크제어에 의하여 공전이 거의 발생하지 않고, 재점착이 이루어지는 것을 확인할 수 있었다. 또한 그림 8의 경우와 비교하여 차량속도의 증가기울기가 현저히 상승함을 확인할 수 있고, 점착력의 감소도 적음을 알 수 있다.

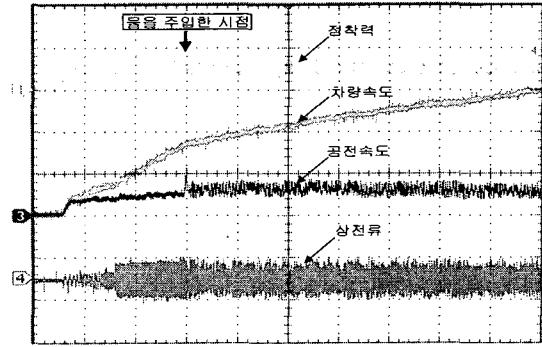


그림 9 Anti-slip 제어를 한 경우의 파형
Fig 9 Waveform of anti-slip control
①점착력(100N/Div) ②차량속도(20km/h/Div)
③공전속도(1km/h/Div) ④상전류(20A/Div) Time Div:(2s)

5. 결 론

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

- [1] 바퀴와 레일사이의 실제 점착력 계수를 부하토크외란 관측기를 통하여 실시간으로 추정하고, 추정된 점착력 계수를 통하여 점착력을 추정하여 최대 견인력 제어가 가능할 수 있었다.
- [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 토크와 차량속도는 일정한 가속 제어가 가능하도록 하였다.

참 고 문 헌

- [1] Kiyoshi 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 Invertterived 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