

외란관측기를 이용한 최대 점착력 추정에 관한 연구

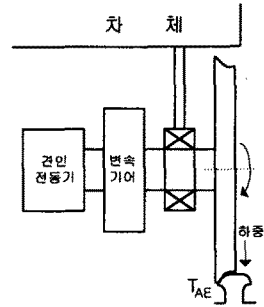
전기영¹⁾, 이승환²⁾, 오봉환³⁾, 강승욱⁴⁾, 이훈구⁵⁾, 김용주⁶⁾, 한경희⁷⁾
 명지대학교, ²⁾대덕대학, ³⁾명지전문대학, ⁴⁾가톨릭상지대학, ⁵⁾용인송담대학, ⁶⁾동양공업전문대학

Study on Maximum Adhesive Effort Estimation using Disturbance Observer

K.Y. Jun¹⁾, S.H. Lee²⁾, B.H. Oh³⁾, S.U. Kang⁴⁾, H.G. Lee⁵⁾, Y.J. Kim⁶⁾, K.H. Han⁷⁾
 Myongji Univ., ²⁾Taedok Col., ³⁾Myongji Col., ⁴⁾Catholic Sangji Col., ⁵⁾Yong-in Songdam Col., ⁶⁾Dong Yang Tech.Col.

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.

용한다. 그림 1은 전기철도차량의 견인력 발생부의 구성 및 전달구조를 나타낸다.



1. 서론

최근 철도차량의 견인시스템은 전력용 반도체 소자와 DSP의 발달로 인하여 고성능 견인력 제어가 가능하게 되었다. 이러한 유도전동기 견인시스템은 소형 경량이며, 높은 신뢰성 및 유지보수성을 가지기 때문에 차량의 고속운전이 가능하다.^[1] 그러나 이와 같은 견인부의 동력발생효율에도 불구하고, 바퀴의 공전과 같은 문제점이 발생하여 철도차량의 견인능력을 감소시킨다. 철도차량은 바퀴와 레일사이의 마찰로서 견인력을 전달하므로 마찰력 이상의 구동력은 공전을 발생시킨다. 공전이 발생하면, 점착력을 저하시켜 견인능력을 감소시키고, 기계적 손상 및 소음을 유발시킨다. 또한 마찰력 변동으로 인한 공전 발생 및 재점착이 반복 수행되면, 전달 견인력에 리플이 발생하여 차간 진동을 발생시켜 차량의 안전성을 저하시킨다. 그러므로 공전을 방지하기위해서 마찰력에 의한 견인력 제한치인 최대점착력을 충분히 활용할 수 있는 견인력제어 방법이 절대적으로 필요하다.^[2-4]

그림 1. 전기철도차량의 견인력 발생부

그림 1과 같은 견인력 발생부에서 바퀴와 레일사이의 마찰력보다 큰 견인력은 차체에 전달 될 수가 없다. 그러므로 차체에 전달가능한 견인력은 차량속도의 증가에 대해 감소하는 특성을 가지는 마찰력 곡선에 의해 제한된다. 이러한 견인력 전달 제한은 바퀴와 레일의 구조를 가지는 견인력 전달 시스템에서는 피할 수 없는 특성이 다.^[2]

본 논문에서는 부하외란 관측기를 통해 바퀴와 레일사이의 최대 점착력을 추정하여 견인력을 제어하는 재점착 제어에 대하여 제안한다. 철도차량시스템에서 견인부와 차체를 각각 하나의 등가 질량계로 모델링하고, 견인부와 차체는 점착력 특성을 가지는 마찰면으로 연결된다. 그러므로 견인부의 구동력 의한 바퀴와 선로사이의 점착력은 견인부의 부하외란과 같이 표현된다. 이와같은 시스템 모델링과 전동기 토오크에 대한 회전자 위치 정보를 이용하여 관측기의 상태변수인 최대 점착력을 추정하여 안정된 견인력 제어가 되도록 하였다.^[5-7]

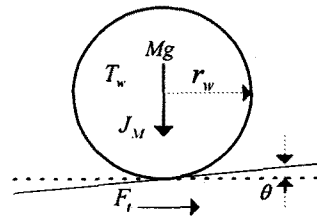


그림 2. 바퀴와 레일사이의 특성

그림 2는 바퀴의 구동력 T_w 의 발생에 따라 바퀴와 레일사이에는 마찰력에 의한 점선력 F_{AE} 가 반대방향으로 작용한다. 이 힘을 점착력이라고, 차체에 전달되는 견인력 특성을 결정한다. 그리고 식(1)에서처럼 점착력을 차체의 하중으로 나눈 값을 점착계수라 한다.

$$F_{AE} = \mu_{AE}W = \mu_{AE}Mg$$

$$\mu_{AE} = F_{AE}/W \tag{1}$$

점착력 특성은 바퀴와 레일사이의 점착상태 즉, 두 부분의 재질 특성, 접촉면의 형상상태에 대한 마찰 상태를 나타내는 힘이므로 점착력특성은 마찰력 특성과 유사하다. 그림3은 선로 표면이 건조한 상태와 젖은 상태에 있어서의 공전속도에 대한 점착력 특성곡선을 나타낸다. 공전속도 v_s 에 대해 바퀴의 구동력 증가에 따라 점착력도 증가하는 안정영역,

2. 철도 차량시스템의 모델링

2.1 견인력 전달시스템

전기철도차량의 견인전동기의 구동력 T_w 은 변속기와 축에 의해 바퀴에 전달되고, 전달된 구동력은 바퀴와 레일의 마찰계수와 차체의 하중의 곱으로 표현되는 마찰력 T_A 에 의해 차량에 전달된다. 이때 마찰력에 의해 차량에 전달된 힘은 운송능력을 결정하는 견인력으로서 작

$$T_w < T_F \text{인 경우, } \frac{dT_w}{dt} > 0 \text{이면 } \frac{dv_s}{dt}, \frac{dT_{AE}}{dt} > 0$$

구동력 증가에 따라 점착력도 감소하는 불안정영역,

$$T_w > T_F \text{인 경우, } \frac{dT_w}{dt} > 0 \text{이면 } \frac{dv_s}{dt} > 0, \frac{dT_{AE}}{dt} < 0$$

그리고 두영역 경계에서는 최대 점착력에 의한 최대견인력이 발생한다.

$$T_w \cong T_F \text{인 경우, } \frac{dT_w}{dt} \cong 0 \text{이면 } \frac{dv_s}{dt}, \frac{dT_{AE}}{dt} \cong 0$$

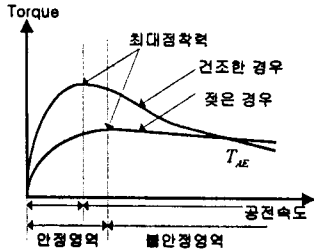


그림 3. 공전속도에 따른 점착력 특성곡선

2.2 시스템 모델링

철도차량의 견인부는 견인전동기, 감속기어, 축 그리고 바퀴로 이루어져 있다. 바퀴에 전달된 구동력은 점착력에 의해 차체의 견인력으로 전달된다. 식 (2)는 전달된 견인력에 의한 차량의 운동방정식이고, 차량속도는 식 (3)에 의해 구해진다.^[5-6]

$$M \frac{d}{dt} v_i = F_i - R_i - Mgsin\theta \quad (2)$$

$$v_i = \int \frac{F_i - R_i - Mgsin\theta}{M} dt \quad (3)$$

여기서, M 은 차량의 질량이며, v_i 는 차량속도, F_i 는 점착력에 의해 전달된 견인력이다. 또한 R_i 는 공기 저항 등 모든 주행저항이며, $Mgsin\theta$ 는 θ 의 선로 구배에 대한 구배저항 성분을 나타낸다. 견인력 전달 구조에서 차체와 견인력 발생부는 바퀴와 레일의 점착력 특성에 의해 분리될 수 있다. 즉 점착력은 전동기에서는 부하토크로서 취급되고, 차체에서는 견인력으로 취급된다.

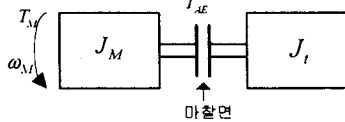


그림 4. 차량시스템의 등가모델

그림 4는 견인전동기, 변속기어, 축 그리고 바퀴를 하나의 질량계인 J_M 으로 모델링하고, 차체는 등가질량계인 J_I 로 나타낼 수 있다. J_M 과 J_I 는 점착력 특성을 가지는 마찰면으로 연결된다. 그러므로 전동기 토크 T_M 의 발생에 따라, 바퀴와 레일사이 점착력 T_{AE} 는 J_M 의 외란성 토크 T_L 과 같이 동작한다. 다음은 견인부 시스템의 토크 방정식을 나타낸다.

$$T_M = J_M \frac{d\omega_M}{dt} + T_L + B\omega_M \quad (3)$$

$$T_M = J_M \frac{d\omega_M}{dt} + T_{AE} + B\omega_M \quad (4)$$

$$T_M = J_M \frac{d\omega_M}{dt} + F_{AE} \frac{r_w}{R_g} + B\omega_M \quad (5)$$

$$T_w = T_M \cdot R_g, \quad \omega_w = \frac{\omega_M}{R_g}, \quad T_{AE} = F_{AE} \cdot r_w$$

T_M : 전동기토크, F_{AE} : 점착력, R_g : 기어비
 ω_M : 전동기기계회전속도 J_M : 전동기 등가관성,
 B : 마찰계수, r_w : 차량바퀴의 반경

그림 5는 식(2)와 식(5)의 미분방정식을 이용한 견인시스템의 제어블록도를 나타낸다. v_w 는 전동기의 각속도 ω_M 으로부터 얻어진 바퀴의 선속도이다. 그리고 공전속도는 차량바퀴의 선속도와 차량속도의 차의 절댓값으로 정의한다.

$$v_s = |v_w - v_i| = |\omega_w \cdot r_w - v_i| = \left| \frac{\omega_M \cdot r_w}{R_g} - v_i \right| \quad (6)$$

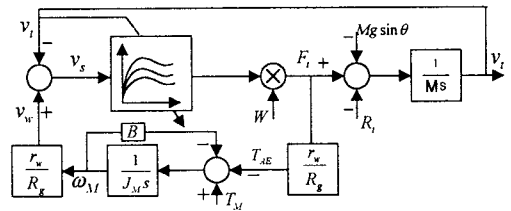


그림 5. 견인시스템의 제어블록도

2.3 재점착 제어

최대점착력에서 전동기의 구동력을 제어하기 위해서는 점착력에 대한 정보가 필요하다. 그러나 점착력을 직접 측정하는 것은 불가능하다. 식(5)의 전동기 토크 방정식에서 점착력은 전동기의 부하토크로서 취급된다. 그러므로 전동기 출력토크에 대한 전동기 회전자의 위치 정보를 통해 전동기의 부하토크로서 취급되는 외란부하관측기를 설계하고, 관측기의 상태변수인 점착력을 추정하도록 한다.^[4-7]

$$\frac{d}{dt} \begin{bmatrix} \hat{\theta}_M \\ \hat{\omega}_M \\ \hat{F}_{AE} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 \\ 0 & -\frac{B}{J_M} & -\frac{r_w}{J_M R_g} \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \hat{\theta}_M \\ \hat{\omega}_M \\ \hat{F}_{AE} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ \frac{1}{J_M} \\ 0 \end{bmatrix} T_M + K(\theta_M - \hat{\theta}_M) \quad (7)$$

위의 식(7)에서 게인 $K = [k_1, k_2, k_3]^T$ 라고 가정하고 전달함수의 특성방정식을 구하면 식(8)과 같다.^[6]

$$s^3 + \left(k_1 + \frac{B}{J_M}\right)s^2 + \left(k_2 + \frac{k_1 B}{J_M}\right)s - \frac{k_3 r_w}{J_M R_g} = 0 \quad (8)$$

관측기에 의해서 추정된 점착력은 외란을 많이 포함하고 있으므로 관측기의 특정 방정식은 외란에 강인하게 설계하여야 한다. 그러므로 외란에 강인한 필터를 설계하기 위하여 대역폭 ω_n 을 갖는 3차 필터 특성방정식을 설계하였다.

$$(s + \omega_n)(s^2 + \omega_n s + \omega_n^2) = s^3 + 2\omega_n s^2 + 2\omega_n^2 s + \omega_n^3 = 0 \quad (9)$$

식 (8)과 (9)로부터 $K = [k_1, k_2, k_3]^T$ 를 구하면 다음과 같이 표현한다.

$$[k_1, k_2, k_3]^T = \left[2\omega_n - \frac{B}{J_M}, 2\omega_n^2 - \frac{B}{J_M} \cdot k_1, -\frac{J_M R_g}{r_w} \cdot \omega_n^3 \right]^T \quad (10)$$

그림 3에서 최대점착력 영역에서의 공전속도와 점착력 사이에는 $\frac{dF_{AE}}{dv_s} = 0$ 의 관계가 성립한다. 그러므로 만약,

$$\frac{dF_{AE}}{dv_s} = 0 \text{ 이라고 하면 이전 샘플링 주기에서의 공전속}$$

도를 그대로 유지하고, $\frac{dF_{AE}}{dv_s} \neq 0$ 이라고 하면 새로운

공전속도를 필요로 한다.

$$\frac{dF_{AE}}{dv_s} = 0 \text{를 다시 표현하면, } \frac{dF_{AE}}{dv_s} = \frac{dF_{AE}}{dt} / \frac{dv_s}{dt} \text{로}$$

표현되는데 $\frac{dv_s}{dt}$ 는 외란에 민감하므로 $\frac{dF_{AE}}{dt}$ 를 사용하여 공전속도를 다음과 같이 구한다.

$$v_s^* = v_s + \eta \frac{dF_{AE}}{dt} \quad (11)$$

그러므로, 식(6)과 식(11)을 이용하여 전동기속도 지령치를 다음과 같이 구할 수 있다.

$$\omega_M^* = \frac{R_g}{r_w} (v_s^* + v_i) \quad (12)$$

3. 시뮬레이션

시뮬레이션을 위한 구성은 ICIM 방식으로 구성한다. 실제 점착력에 대한 점착력의 추정 특성을 확인하고 마찰계수 변화시 재점착제어의 특성을 확인하기 위해서 차량 시스템과 점착력 특성을 그림 3과 4처럼 모델링하여 시뮬레이션 하였다. 시뮬레이션은 재점착제어를 확인하기 위해서 레일과 바퀴사이가 건조한 경우의 최대점착계수를 0.16, 젖은 경우의 최대점착계수는 0.12로 하였다. 표 1은 시뮬레이션 사양을 나타낸다.

표1 시뮬레이션 사양

출 력	50[kW]	R_r	0.0372[Ω]
정격 전압	380[V], 60[Hz]	L_s	7.197[mH]
정격토크	80[N·m]	L_r	7.007[mH]
정격회전수	1750[RPM]	L_m	6.722[mH]
R_r	0.0287[Ω]	J_M	0.08[kg·m ²]

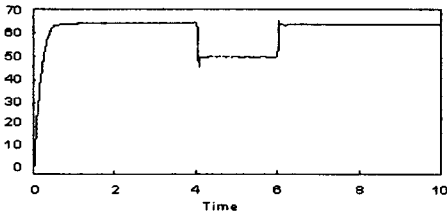


그림 7. 전동기의 구동력 T_M

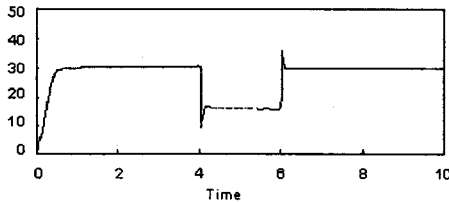


그림 8. 관측기를 이용한 추정 점착력 \widehat{F}_{AE}

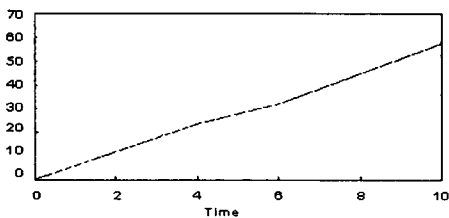


그림 9. 차량의 속도 v_i

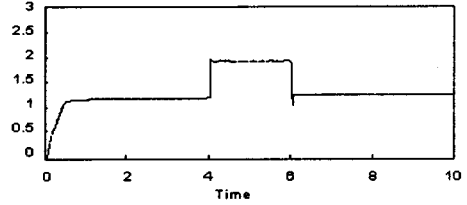


그림 10. 공전속도 v_s

그림 7, 8, 9, 10은 처음 4초동안은 선로표면이 건조한 경우이고, 4초에서 6초동안은 선로표면이 젖은 경우, 다시 6초에서 10초까지 선로표면이 건조한 경우를 가정하여 시뮬레이션 하였다. 그림 7과 8에서처럼 구동력은 최대점착력이 되도록 제어되었고, 그림 9는 차량속도로써 선로표면이 젖은 경우의 2초동안 속도의 증가율이 감소하였다. 그리고 그림 10은 선로 표면이 건조한 경우와 젖은 경우의 공전속도로서 그림에서처럼 공전속도의 빈번한 변화가 발생하지 않으므로 안정적인 견인력 제어 특성을 얻을 수 있었다.

4. 결 론

본 논문에서는 부하외란 관측기를 통해 바퀴와 레일 사이의 최대 점착력을 추정하고, 재점착제어하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

- [1] 바퀴와 선로사이의 최대점착력을 추정하고, 추정된 점착력을 이용하여 최대견인력 제어가 되도록 하였다.
- [2] 상태변수 추정을 통하여 시스템 외란 및 상수 설정에 대하여 안정적인 제어가 되도록 하였다.
- [3] 공전속도의 빈번한 변화가 발생하지 않으므로 안정적인 견인력 제어 특성을 얻을 수 있었다.

(참 고 문 헌)

- [1] Heinisch, R, "High Speed Train in Germany", Rail International, Vol.6-7, pp.23-28, 1992
- [2] 서광덕, "점착력 추정에 의한 고능률 재점착제어", 서울대학교 대학원 공학박사 학위논문, pp.13-28, 1995
- [3] M.Iwahori, R.Inoue, "Anti-Slip Control of VVVF Inverter Driven EMUs", STECH, Vol.2, pp.255-260 November, 1993
- [4] Yoshiki 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
- [5] "추진제어장치 연구개발 결과보고서", 한국철도기술연구원 1998
- [6] 김우석외3, "최대점착력 추정을 이용한 철도차량의 재점착 제어 성능 개선" Vol.49B, No.1, pp33-35 JAN. 2000
- [7] Yoshiki Ishikawa, Atsuo Kawamura, "Maximum Adhesive Force Control in Super High-Speed Train", PCC-Nagaoka'97, pp.951-954, 1997