

관성변화시의 Anti-slip 제어기에 의한 유도전동기 병렬운전

전기영, 김종교
중소기업진흥공단

Parallel Running of Induction Motor by Anti-slip Controller of Inertia Conversion

Kee-Young Jeon, Jung-gyo Kim
Small Business Corporation

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, inertia conversion the electric motor coach has slip phenomena. This paper proposes a anti-slip control algorithm which uses the maximum adhesive effort by instantaneous estimation of adhesion force using load torque disturbance observer. Based on this estimated adhesive effort, the anti-slip control is performed to obtain the maximum transfer of the tractive effort.

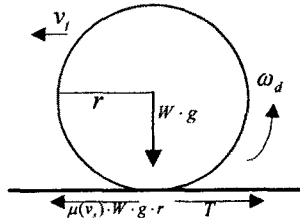
1. 서 론

철도차량은 레일과 바퀴사이의 마찰로서 견인력을 전달하므로 접착력 이상의 구동력은 공전(slip)을 발생시키고 주행중 관성 변화에 대한 제어를 수행하여야 한다.^[1]
그러므로 본 논문에서는 주행중 관성변화에 대한 최대 견인력 제어를 위해서 최소 차원 부하 토크 외란 관측기를 이용하여 접착력 계수를 추정하고 추정된 접착력 계수의 미분치를 PI 토크 제어하는 Anti-slip제어를 하여, 추정된 접착력이 최대접착력에서 유지되도록 전동기를 토크 제어한다. 최소차원 부하 토크 외란 관측기는 회전자의 위치 정보와 토크 전류의 정보를 이용 하여 부하 외란토크를 추정하고, 부하 외란 토크에 차량 상수를 이용하여 접착력 계수를 추정하도록 하여 최대 견인력 제어가 되도록 한다. 이와 같은 알고리즘을 실제 철도차량시스템에 적용하여 철도차량이 최대 견인력에서 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 접착력에 의해 견인력이 발생하기 때문에, 접착력 이상의 구동력은 공전을 발생시킨다. 공전이 발생하면, 바퀴와 레일사이의 접착력이 감소하여 견인력은 현저히 감소하게 된다. 그러므로 본 논문에서는 전동차의 공전현상을 분석하기 위해서 IC4M에 의해 구동되는 한 개의 바퀴에 대하여 모델링 하였다.^[2]



<그림 1> 바퀴-레일 사이 접착특성

그림 1은 바퀴와 레일사이의 접착특성의 관계를 나타낸 것이다. 견인전동기에서 발생한 구동력은 기어와 차축을 통하여 차량바퀴에 전달된다. 전달된 견인전동기의 구동력은 차량바퀴와 레일사이의 접착력에 의해 차량에 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 접착력 $\mu(v_s)Wg$ 와 상용하는 바퀴의 토크이다.

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

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

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

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

$$M_j \cdot \frac{d}{dt} v_d = F_t - \mu(v_s) \cdot W \cdot g \quad (4)$$

바퀴-전동기 사이의 또 다른 관계식은 식 (5), (6), (7)과 같이 표현한다. 여기서, T_m 은 전동기의 토크, ω_m 은 전동기의 전각속도, J_m 은 전동기의 관성모멘트, R_g 는 기어비이다.

$$T = T_m \cdot R_g \quad (5)$$

$$\omega_m = R_g \cdot \omega_d \quad (6)$$

$$J_m = \frac{J}{R_g^2} \quad (7)$$

식 (1)~(7)의 수식으로부터 전동차의 바퀴와 전동기 사이의 관계식이 성립한다.

2.2 접착력 계수 추정 시스템

식 (8)은 전동기의 토크 방정식으로서 전동기의 회전각속도에 대한 일차 미분방정식의 형태로 표현된다. T_L 은 전동기의 부하 외란 토크이며, 외란 관측기에 의해서 추정한다.

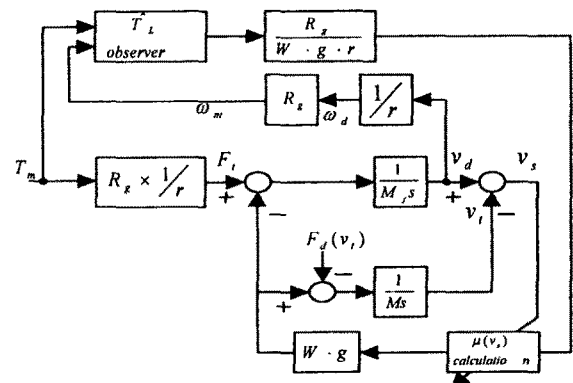
$$\hat{T}_L = \frac{1}{1 + \frac{J_m}{G} s} (K_T i_T - s J_m \omega_m) = \frac{1}{1 + \frac{J_m}{G} s} T_L \quad (8)$$

식 (8)에서 보이는 것과 같이 구성된 외란 관측기에 의해서 외란 토크를 추정할 수 있다. 또한, 레일-바퀴 사이의 접착력계수 $\mu(v_s)$ 는 식 (9)에서처럼 외란토크 \hat{T}_L 을 사용하여 계산된다. 식(10)은 접착력계수 $\mu(v_s)$ 의 미분치를 나타낸다.

$$\hat{\mu}(v_s) = \frac{R_g}{W \cdot g \cdot r} \hat{T}_L \quad (9)$$

$$\hat{\dot{\mu}}(v_s) = \frac{d\hat{\mu}(v_s)}{dt} = \frac{R_g}{W \cdot g \cdot r} \hat{\dot{T}}_L \quad (10)$$

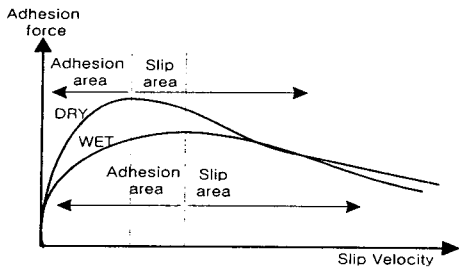
그림 2는 식 (1)-(10)의 수식으로부터 전동차의 공전현상과 제안된 부하토크외란관측기에 의한 접착력계수 추정 블록도를 나타낸다.



<그림 2> 접착력계수의 추정 블록도

2.3 Anti-Slip 제어 시스템

Anti-slip 제어는 최대 접착력에 일치하는 구동 토크를 유지하도록 제어 한다. 그림 3에서처럼 최대접착력은 접착력과 공전속도 사이의 최대점착계수 $\mu(v_s)_{max}$ 의 조건에서 발생된다. 접착력이 최대값이 되었을 때, 접착력계수 $\mu(v_s)$ 또한 최대값이 된다.



〈그림 3〉 접착력과 공전속도 사이의 특성곡선

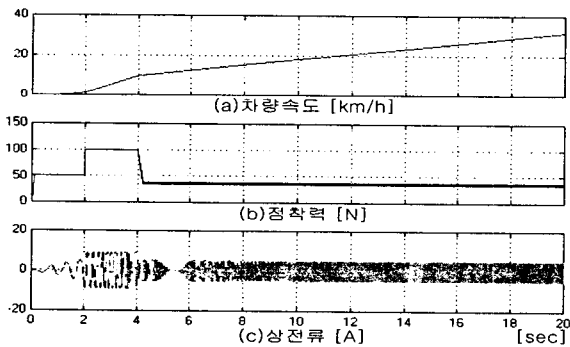
결국, 식 (11)의 관계에서 구동 토크 T_m 은 최대접착력에서 구동하게 된다. 일반적으로, 전동차의 공전속도 v_s 는 매우 작고, 변화량 또한 매우 작다. 그러므로, 본 논문은 식 (12)의 조건 방정식으로부터 최대접착력을 추정한다.

$$\frac{dv_s}{dv_s} = \frac{d\mu}{dv_s} = \frac{d\mu}{dt} \cdot \frac{dt}{dv_s} \quad (11)$$

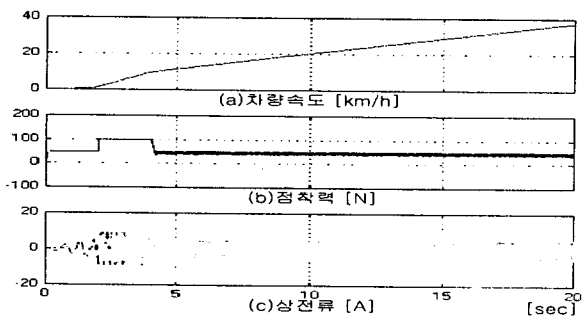
$$\frac{d\mu}{dt} = 0 \quad (12)$$

3. 시뮬레이션 및 실험결과

그림 4, 5는 $J=5J_m$ 의 관성변화시 non Anti-slip제어와 Anti-slip제어 경우의 차량속도, 접착력, 견인전동기의 상전류파형을 나타낸다. 전동차 기동 4초후에 공전이 발생하면, non Anti-slip제어 경우에는 공전속도 증가에 의한 접착력과 차량속도의 감소를 확인할 수 있었고, Anti-slip제어 경우에는 접착력과 차량속도가 non Anti-slip제어 경우와 비교하여 접착력의 감소율이 적었고, 차량속도의 증가 기울기가 현저히 상승함을 확인 하였다.



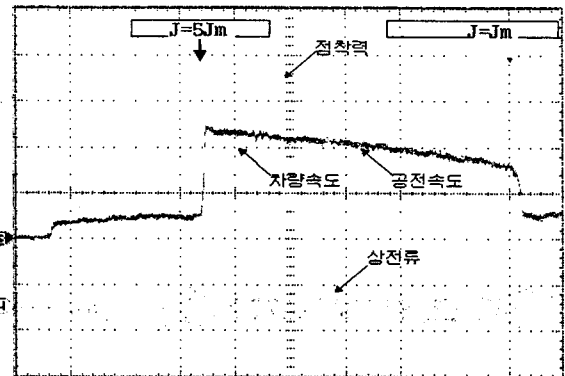
〈그림 4〉 rAnti-slip PI 토크 제어를 하지 않은 경우



〈그림 5〉 Anti-slip PI 토크 제어를 한 경우

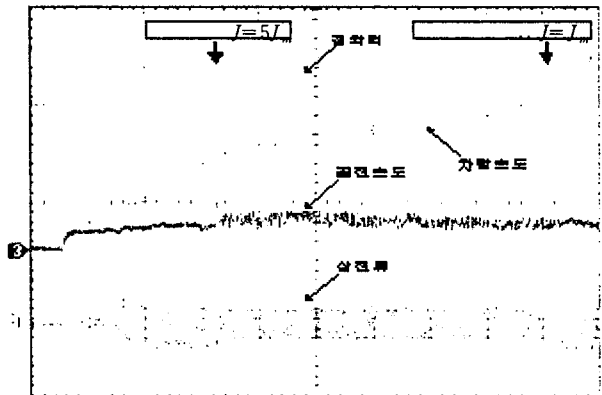
그림 6과 7은 notch1과 2로 기동토크를 주다가 $J=5J_m$ 관성변화와 다시 $J=J_m$ 경우의 접착력과, 공전속도, 차량속도, 상전류파형을 나타낸다.

그림 6은 non Anti-slip PI토크제어 경우이고, 그림 7은 Anti-slip PI토크제어의 경우이다. 관성변화시의 경우에도 추정된 접착력에 의해 전동기 구동력은 안정적으로 제어된다. 또한 공전속도는 0.7[km/h]정도를 유지하고 있다. 이는 최적 공전속도와 거의 일치한다. 그러므로 견인력은 최대점착력에서 제어 되고 있음을 알 수 있었다.



〈그림 6〉 Anti-slip 제어를 하지 않은 경우의 파형

- ①접착력[100N/Div] ②차량속도[10km/h/Div]
- ③공전속도[1km/h/Div] ④상전류[20A/Div] T/D:[2s]



〈그림 7〉 Anti-slip 제어를 한 경우의 파형

- ①접착력[100N/Div] ②차량속도[10km/h/Div]
- ③공전속도[1km/h/Div] ④상전류[20A/Div] T/D:[2s]

4. 결 론

본 논문에서는 부하토크의란 관측기를 구성하여 관성변화시 접착력계수를 추정하고, 추정된 접착력계수의 미분치를 PI 토크 제어하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

- [1] 관성변화시 바퀴와 레일사이의 실제 접착력계수를 부하 토크의란 관측기를 통하여 실시간으로 추정하고, 추정된 접착력계수를 통하여 접착력을 추정하여 최대 견인력 제어가 가능하였다.
- [2] 관성변화시 공전속도에 의한 접착력계수가 변화한 후에도 구동력과 차량속도는 일정한 가속 제어가 가능하도록 하였다.

[참 고 문 헌]

- [1] H. Ueda, K. Nagai, " The Prospects and Problems of Speed_up on Intercity Railway Lines in Japan-In Comparison with European High Speed Trains," (STEDH) Conference Record, Vol. 1, pp.13~18, November, 1993
- [2] S. Senini, F.Flinders, W. Oghanna, " Dynamic Simulation of Wheel-Rail Interaction for Locomotive Traction studies." AESM/IEEE Joint Railroad Conf. Rec, pp.27~34, May, 1993