

부하토크외란관측기와 속도센서리스 벡터제어를 이용한 철도모의장치의 Anti-Slip 제어

이상집*, 권중동*, 김은기*, 조정민*, 전기영*, 이승환**, 오봉환§,
이훈구§§, 김용주§§§, 한경희*

*명지대학교, **대덕대학, §명지전문대학, §§용인송담대학, §§§동양공업전문대학

Anti-Slip Control of Railway Vehicle Using Load Torque Disturbance Observer and Speed Sensor-less Vector Control

S.C. Lee*, J.D. Kwon*, Y.K. Kim*, J.M. Jho*, K.Y. Jeon*, 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 §§§ Dongyang Tech. College

ABSTRACT

This paper estimate coefficient of adhesion through speed sensor-less vector control and load torque disturbance observer used for maximum tractive force control. And also proposes anti-slip control algorithm, which controls torque force of motor in order to keep the estimated adhesion force in maximum adhesion by controlling PI torque with the differential value of estimated adhesion force coefficient.

1. 서 론

철도차량시스템의 운송능력 증대를 위한 가감속 운전 성능향상과 고속화를 위해서는, 견인 전동기의 동력 발생 성능의 향상과 더불어, 공전을 빠르게 감소 시킬 수 있는 제어와 마찰력에 의한 견인력 전달 제한치인 최대 점착력을 충분히 활용할 수 있는 견인력 제어방법이 필요하다[1][2]. 그러나 이와 같은 견인력 제어를 위해서는 점착력 계수를 필요로 하는데, 점착력 계수를 직접 검출 할 수 있는 방법이 없다. 그리고 점착력 계수를 추정하기 위해서는 전압, 전류값 뿐만 아니라 자속이나 속도정보가 필수적이다. 따라서 전동기의 회전속도를 정확하게 검출할 수 있는 속도센서가 필요하게 된다. 그러나 속도검출을 위해 속도센서를 부착하는 것은 여러 가지 면에서 단점을 가지고 있다.[3]

그러므로 본 논문에서는 최대 견인력제어를 위해서 속도센서리스벡터제어와 부하토크 외란관측기를 통하여 점착력 계수를 추정한다. 추정한 점착력 계수의 미분치를 PI 토크 제어하여, 추정된 점착력이 최대점착력에서 유지되도록 전동기를 토크 제어하는 Anti-slip제어 알고리즘을 제안한다.

2. 철도 차량시스템의 모델링

2.1 전동차의 공전(Slip)현상

그림 1은 바퀴와 레일사이의 점착특성의 관계를 나타낸 것이다. 그림 1과 같이 바퀴구동력 T의 발생에 따라 바퀴와 레일 사이에는 마찰력에 의한 접선력 F_{AE} 가 반대방향으로 작용한다. 이 힘을 점착력이라 하는데, 차체에 전달되는 견인력 특성을 결정한다. 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 토크 T_{AE} 이다. 식 (3), (4)는 점착력과 공전속도의 수식을 나타낸다.

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

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

$$F_{AE} = \mu(v_s) \cdot W \cdot g \quad (3)$$

$$v_s = v_d - v_t \quad (4)$$

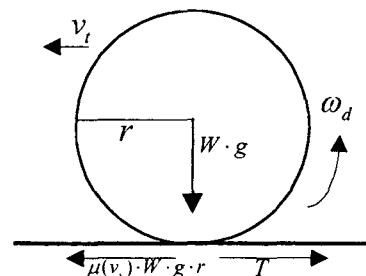


그림 1 레일-바퀴사이의 점착특성
Fig. 1 Adhesion characteristics between wheel and rail

여기서, v_r 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, $F_d(v_r)$ 는 전동차의 주행저항, g 는 중력가속도, r 은 바퀴의 반지름이다.

2.2 속도추정기

회전자 속도 추정기를 구현하기 위한 유도전동기의 전압방정식을 정리하면 식(5)와 같다.

$$\begin{bmatrix} v_{ds}^s \\ v_{qs}^s \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R_s + pL_s & 0 & pL_m & 0 \\ 0 & R_s + pL_s & 0 & pL_m \\ pL_m & -\omega_m L_m & R_r + pL_r & -\omega_m L_r \\ \omega_m L_m & pL_m & \omega_m L_r & R_r + pL_r \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{ds}^s \\ i_{qs}^s \\ i_{dr}^s \\ i_{qr}^s \end{bmatrix} \quad (5)$$

자속추정방정식과 회전자 전류방정식은 유도전동기의 회전자 기준좌표계에 대한 고정자 및 회전자 전압방정식에 의해 식 (6), (7), (8)로 표현할 수 있다.

$$\begin{aligned} p \lambda_{dr}^s &= \frac{L_r}{L_m} (v_{ds}^s - (R_s + \sigma L_s p) i_{ds}^s) \\ p \lambda_{qr}^s &= \frac{L_r}{L_m} (v_{qs}^s - (R_s + \sigma L_s p) i_{qs}^s) \end{aligned} \quad (6)$$

$$\begin{aligned} i_{dr}^s &= \frac{1}{pL_m} (v_{ds}^s - R_s i_{ds}^s) - \frac{L_s}{L_m} i_{ds}^s \\ &= \frac{1}{L_m} (\lambda_{ds-F}^s - L_s i_{ds}^s) \end{aligned} \quad (7)$$

$$\begin{aligned} i_{qr}^s &= \frac{1}{pL_m} (v_{qs}^s - R_s i_{qs}^s) - \frac{L_s}{L_m} i_{qs}^s \\ &= \frac{1}{L_m} (\lambda_{qs-F}^s - L_s i_{qs}^s) \end{aligned} \quad (8)$$

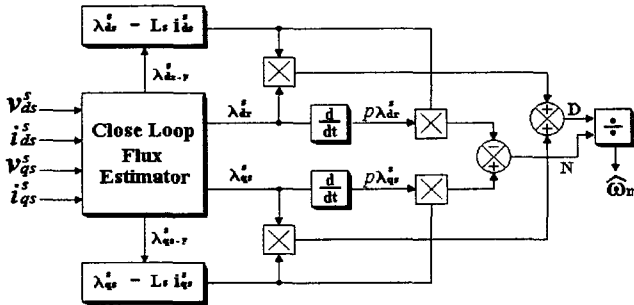


그림 2 회전자 속도 추정기
Fig. 2 Rotor speed estimator

유도전동기 속도 센서리스 벡터제어 시스템의 구동을 위해 식 (5)~(8)로부터 고정자 전류와 페루프 적분방식의 자속 보상기로 추정된 자속값을 이용하여 회전자 속도를 구하면 식(9)와 같다. 회전자 속도를 구하기 위한

회전자 속도 추정기를 구성하면 식 (9)에 의해 그림 2와 같이 구성 할 수 있다.

$$\hat{\omega}_m = \frac{(\lambda_{ds-F}^s - L_s i_{ds}^s) p \lambda_{qr}^s - (\lambda_{qs-F}^s - L_s i_{qs}^s) p \lambda_{dr}^s}{(\lambda_{ds-F}^s - L_s i_{ds}^s) \lambda_{dr}^s + (\lambda_{qs-F}^s - L_s i_{qs}^s) \lambda_{qr}^s} \quad (9)$$

2.3 점착력 계수 추정 시스템

식 (10)은 일반적인 전동기의 토크 방정식으로서 전동기의 회전각속도에 대한 일차 미분방정식의 형태로 표현된다. 식(11)은 전동기의 토크성분을 토크전류와 상수의 곱 형태로 표시한 수식이다. T_L 은 전동기의 부하 외란 토크이며, 외란 관측기에 의해서 추정한다. ω_m 은 견인 전동기의 속도이며, K_T 는 토크상수이다.

$$J_m \frac{d}{dt} \omega_m = T_m - T_L \quad (10)$$

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

식 (10), (11)을 식 (2)에 대입하면, 식 (12)와 같은 수식을 얻을 수 있다.

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

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

식 (12), (13)에서와 같이 $\frac{1}{R_g} \mu(v_s) W g r$ 은 전동기의 외란토크로서, 레일-바퀴간의 점착토크에 상응하는 전동기의 부하 토크가 된다. 그러므로, 부하 토크 T_L 을 추정하기 위하여 부하 토크외란 관측기를 적용하여 부하토크를 구하면 식(14)와 같고, 추정 점착계수는 식(15), 추정 점착계수의 미분치는 식(16)과 같다.

$$\hat{T}_L = \frac{1}{1 + \frac{J_m}{G} s} (K_T i_T - s J_m \omega_m) = \frac{1}{1 + \frac{J_m}{G} s} T_L \quad (14)$$

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

$$\hat{\mu}(v_s) = \frac{d\mu(v_s)}{dt} = \frac{R_g}{W \cdot g \cdot r} \hat{T}_L \quad (16)$$

2.4 Anti-Slip 제어 시스템

일반적으로, 점착력 $\mu(v_s) W g$ 와 공전속도 v_s 간의 특성 곡선은 그림 3과 같이 표현된다. 점착력의 최대값을 최대점착력이라 하고, 최대점착력계수 $\mu(v_s)_{max}$ 의 상태에서 생긴다. 전동차의 구동토크 T_m 이 최대점착력을 넘으면, 전동기는 공전이 발생한다. Anti-Slip 제어는 최대 점착력에 일치하는 구동 토크를 유지 하도록 제어 한다. 그림 3에서처럼 최대점착력은 점착력과 공전속도 사이의 기울기가 "0"인 최대점착계수 $\mu(v_s)_{max}$ 의 조건에서 발생된다. 점착력이 최대값이 되었을 때, 점착력계수 $\mu(v_s)$ 또한 최대값이 된다.

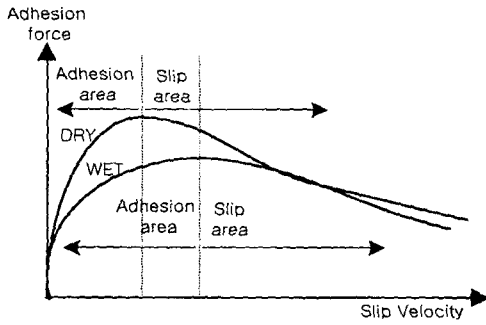


그림 3 점착력과 공전속도 사이의 특성곡선
Fig. 3 Characteristics curve between adhesion effort and slip velocity

결국, 식 (17)의 관계에서 구동 토크 T_m 은 최대점착력에서 구동하게 된다. 일반적으로, 전동차의 공전속도 v_s 는 매우 작고, 변화량 또한 매우 작다. 그러므로, 본 논문은 식 (18)의 조건 방정식으로부터 최대점착력을 추정한다.

$$\frac{d\mu}{dv_s} = \frac{d\mu/dt}{dv_s/dt} = \frac{d\mu}{dt} \cdot \frac{dt}{dv_s} \quad (17)$$

$$\frac{d\mu}{dt} = 0 \quad (18)$$

그림 4는 부하토크 외란관측기를 이용한 Anti-slip PI 토크 제어시스템의 전체제어블록도를 나타낸다.

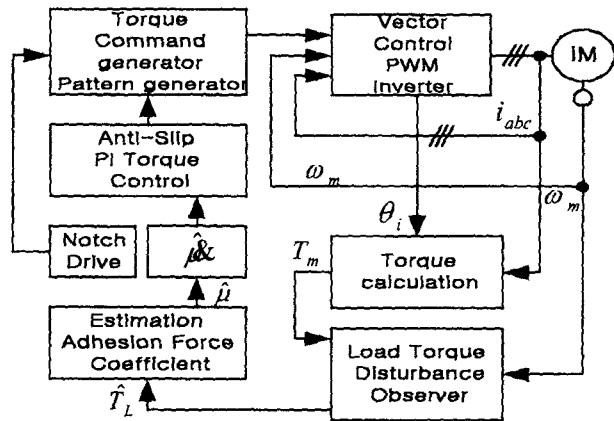


그림 4 부하토크외란관측기를 이용한 Anti-slip 토크제어
Fig. 4 Anti-slip PI torque control system with Load torque disturbance observer

속도센서리스벡터제어에 의하여 견인전동기의 속도를 추정하고, 추정한 속도의 정보를 이용하여, 부하 외란 토크를 순시적으로 추정한다. 순시적으로 추정한 부하 외란 토크에 철도차량 상수를 이용하여 점착력 계수를 추정한다. 또한, 점착력계수의 미분치는 노이즈에 강인한 미분관측기를 구성하여 사용하였다. Notch 운전시, 레일-바퀴사이의 점착력계수와 공전속도 사이의 관계에서, 점착력계수 미분치의 기울기가 0이 아닌 경우의 Anti-slip PI토크지령치 $T_{anti-slip}$ 는 식 (19)와 같다.

$$\begin{aligned} T_{anti-slip} &= (K_P + \frac{K_I}{s}) \cdot s \hat{\mu}(v_s) \\ &= K_P \cdot \hat{\mu}(v_s) + K_I \cdot \hat{\mu}(v_s) \end{aligned} \quad (19)$$

식 (19)에서, Anti-slip PI토크지령치 $T_{anti-slip}$ 의 PI계인 K_P 는 그림3의 점착력과 공전속도사이의 특성곡선에서 점착력계수의 미분치 기울기가 양이 되면, $T_{anti-slip}$ 지령치를 최대점착력이 되는 최적공전속도로 증가시키고, 점착력계수의 미분치기울기가 음이 되면, $T_{anti-slip}$ 지령치를 최대점착력이 되는 최적공전속도로 감소시킨다.

3. 시뮬레이션

그림 5, 6은 non Anti-slip제어와 Anti-slip제어 경우의 차량속도, 점착력, 공전속도를 나타낸다. 전동차 기동 4초후에 공전이 발생하면, non Anti-slip제어 경우에는 공전속도 증가에 의한 점착력과 차량속도의 감소를 확인할 수 있었고, Anti-slip제어 경우에는 점착력과 차량속도가 non Anti-slip제어 경우와 비교하여 점착력의 감소율이 적었고, 차량속도의 증가 기울기가 현저히 상승함을 확인 하였다.

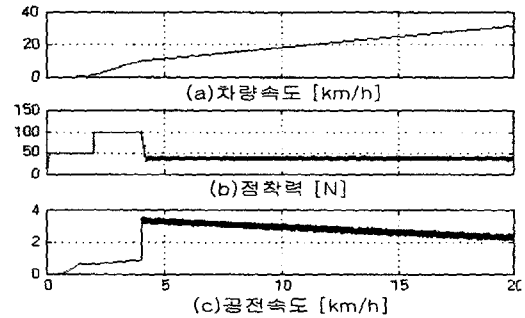


그림 5 Anti-Slip PI 토크 제어를 하지 않은 경우
Fig. 5 In case of non anti-slip PI torque control

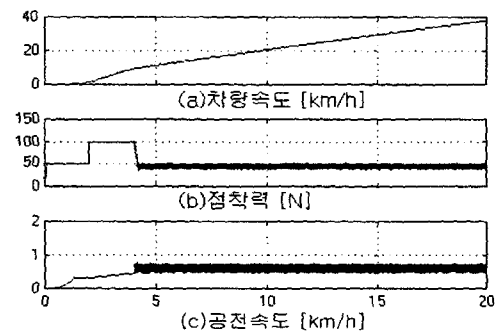


그림 6 Anti-Slip PI 토크 제어를 한 경우
Fig. 6. In case of Anti-Slip PI torque control

4. 실험 결과

그림 7은 IC-IM방식의 전체시스템블록도를 나타내고 있다.

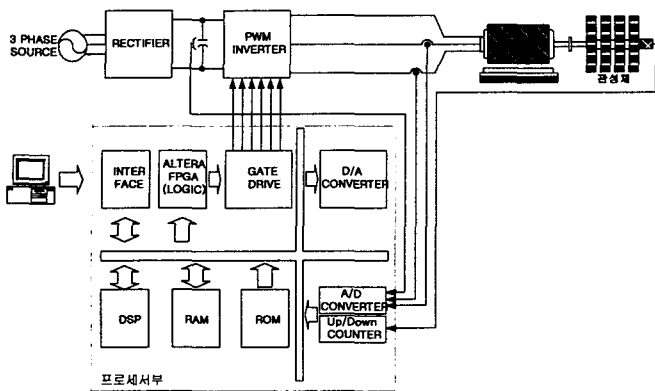


그림 7 전체시스템 블록도
Fig. 7 Block diagram of full system

그림 8은 Anti-slip PI토크제어를 하지 않은 경우로써, 정상상태로 운전하다가 물을 주입한 후 대공전이 발생하여 구동력과 점착력이 감소하는 것을 확인할 수 있었다. 그림 9는 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 10은 Anti-slip PI토크제어를 하지 않은 경우의 구동력과 차량속도의 파형으로 차량속도의 증가 기울기가 감소함을 알 수 있다. 그림 11은 Anti-Slip PI토크제어를 한 경우로써, 그림 10과 비교하여 차량속도 증가 기울기가 상승하는 것을 확인할 수 있었다.

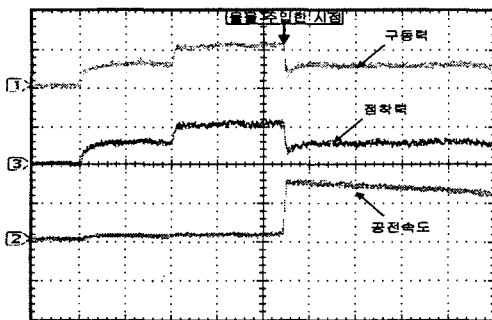


그림 8 Anti-slip 제어를 하지 않은 경우의 파형
Fig. 8 Wave form of non anti-slip control

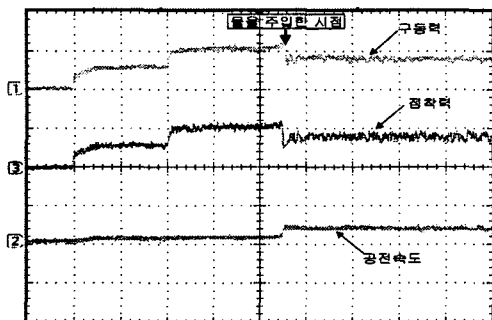


그림 9 Anti-slip 제어를 한 경우의 파형
Fig. 9 Waveform of anti-slip control
①구동력[100N/Div] ②공전속도[2km/h/Div]
③점착력[100N/Div] T/D:[2s]

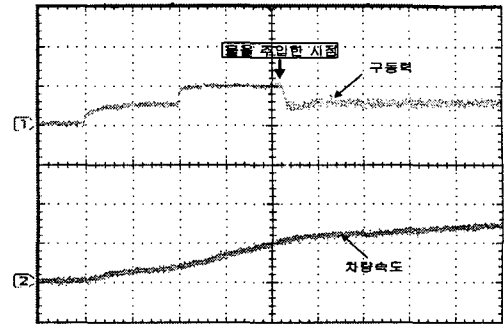


그림 10. Anti-slip 제어를 하지 않은 경우의 파형
Fig. 10. Wave form of non anti-slip control
①구동력[100N/Div] ②차량속도[20km/h/Div] T/D:[2s]

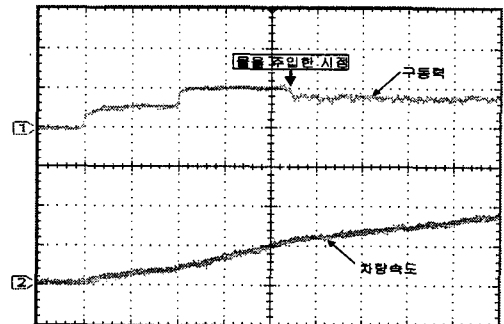


그림 11 Anti-slip 제어를 한 경우의 파형
Fig. 11 Waveform of anti-slip control
①구동력[100N/Div] ②차량속도[20km/h/Div] T/D:[2s]

5. 결 론

본 논문에서는 속도센서리스벡터제어를 이용한 부하토크외란 관측기를 구성하여 점착력계수를 추정하고, 추정한 점착력계수의 미분치를 PI토크 제어하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

- [1] 바퀴와 레일사이의 실제 점착력 계수를 부하 토크외란 관측기를 통하여 실시간으로 추정하고, 추정된 점착력 계수를 통하여 점착력을 추정하여 최대 전인력 제어가 가능함을 확인 하였다.
- [2] 속도센서리스벡터제어를 적용함으로써, 레일의 노면 상태나 구배등 여러 환경조건에 대해서도 정확한 속도정보를 얻을 수 있었다.
- [3] 공전속도에 의한 점착력 계수의 변화에도 불구하고 구동 토크와 차량속도는 일정한 가속 제어가 가능하였다.

참 고 문 헌

- [1] Yoshki Ishikawa, Atsuo Kawamura, "Maximum Adhesive force Control in Super High-Speed Train" PCC-Nagaoka'97, pp.951-954, 1997
- [2] 서광덕, "점착력 추정에 의한 고능률 재점착제어", 서울대학교 대학원 공학박사 학위논문, pp.13-28, 1995
- [3] 전기영, "부하토크외란관측기를 이용한 IC-4M 축소형 철도차량장치의 점착력추정에 의한 Anti-slip제어", 전력전자학회논문지, 제8권 4호, pp366~374, 2003