

전동차용 추진제어장치의 재점착제어에 관한연구

정만규* 조성준 방이석
 현대중공업 기술개발본부 기계전기연구소

A Study On Re-adhesion Control of Propulsion System for Electric Railway Vehicle

M.K. JEONG, S.J. CHO, and L.S. BANG
 Hyundai Heavy Industrial Research & Development Division,
 Electro-Mechanical Research Institute

ABSTRACT

본 논문은 전동차용 추진제어장치의 재점착제어에 관한 것이다. 본 연구에서는 공전검지 방법에 대하여 기술하고, 등가 관성량을 이용한 추정재점착제어에 관하여 제시한다. 서울시 6호선 국산화전동차(609편성)와 광주도시철도 1호선 전동차에 적용하여 재점착 제어성의 우수함과 안정성을 검증하고자 한다.

등 정확한 제어 정보가 부족한 지하철 전동차에 적용하는데는 다소 제한적인 면이 존재한다.

본 논문에서는 전동기 한 대당 등가관성을 이용하여 공전 발생시 적용이 간단한 새로운 추정 재점착제어 방법을 제안한다. 그리고 실제 서울시 6호선 전동차와 광주도시철도 1호선에 적용하여 그 성능을 입증코자 한다.

1. 서 론

현대사회에서 도심의 복잡한 교통량과 운송량의 증가로 전동차량에 대한 요구가 증대되고 있다. 국내의 전동차량은 대부분 1C4M으로 구성되어 있다. 그러나 이러한 구성은 경제적인 측면에서는 장점이지만 반면 제어가 어렵다는 단점이 존재한다. 차량 바퀴의 공전 현상은 바퀴와 선로사이의 점착력이 눈, 비에 의하여 감소될 때 발생한다. 공전은 바퀴와 선로표면의 마모를 유기 하여 바퀴의 손상 및 수명을 단축시킨다. 최근의 철도차량은 IGBT용 인버터와 알루미늄 차체를 사용한 경량화에 의하여 공전발생 가능성이 더욱 커지고 있다. 재점착제어는 바퀴와 선로사이의 공전방지와 감소된 점착력을 최대로 이용하는데 목적이 있다. 고정된 전류패턴에 의한 기존의 재점착제어방식은 공전 현상을 완화할 수는 있었지만 점착력을 최대로 이용할 수 없었다. 그래서 최근에는 관측기를 이용한 재점착제어 알고리즘이 제시되고 있다.^{[1]~[4]} 하지만 이들 알고리즘은 견인부의 관성량, 차량속도 등의 제어정보를 필요로 하기 때문에 실제의 시스템에는 아직 적용이 못되고, 컴퓨터 시뮬레이션과 실험실 레벨의 축소모형을 이용하여 수행되어 왔다. 관측기를 이용한 재점착방법은 견인부의 관성량, 차량속도

2. 공전 및 재점착 검지 방법

그림1은 본 논문에서 적용한 공전검지 방법이다. 각축의 속도를 평균하여 등가 차량속도 V_T 를 계산하고, 이것을 미분하여 등가 차량가속도 a_M 을 구한다. 공전속도 V_s 는 역행시는 최대 축속도 V_{max} 와 등가 차량속도 V_T 의 차로 구하고, 제동시는 최소 축속도 V_{min} 와 등가 차량속도 V_T 의 차로 구한다. 공전가속도 a_s 는 공전속도 V_s 를 미분하여 구한다. 공전가속도 a_s , 공전속도 V_s , 등가 차량가속도 a_M 는 각각의 검지치 a_{dm} , a_{dm} , V_{dm} 이상이 되면 공전이 발생된 것으로 간주하여 점착제어를 수행하도록 하였다.

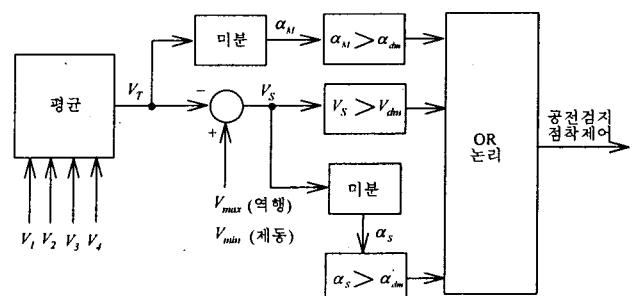


그림 1 공전검지 알고리즘

α_s 공전가속도, V_s 은 공전속도이다. 공전이 발생하면 식(10)과 같이 공전에 의한 전류 감소치 i_a^* 를 구하여 토크 전류지령치 i_{qcmd}^* 에서 차감하여 i_{qse}^* 를 감소시킨다. 공전이 소멸되면 재점착 검지에 따라 공전속도 및 공전가속도에 의해서 감소한 토크 기준전류 i_{qse}^* 를 추정 재점착전류 i_{qAE}^* 의 K배한 재점착전류 지령치 i_{RD}^* 로 회복시킨다. 추정 재점착 전류는 공전이 검지될 당시의 전류량을 식(6)를 이용하여 미리 계산해 둔다. 그리고 일정한 시간이 경과하면 원래의 전류지령치 i_{qcmd}^* 로 회복시킨다.

식(10)에 의한 견인력 감소치는 4바퀴가 동시에 미끄러지는 대공전에 대해서는 성능을 나타내지 못하므로 식(11)과 같이 등가차량속도 V_T 로 부터 계산된 등가 차량가속도 성분 α_M 와 등가 차량가속도 검지치 α_{dm} 와의 차이를 점착제어 성분으로 제어한다. 즉 대공전시는 i_a^* 가 주 성분이 되어 제어된다.

$$i_a^* = K_a (\alpha_M - \alpha_{dm}) \quad (11)$$

여기서 i_a^* 는 대공전시 전류감소분, K_a 는 비례계이다.

결론적으로 대공전시 q축 토크 기준전류는 식(14)와 같이 대공전시 전류감소분 i_a^* 를 추가하여 구한다.

$$i_{qse}^* = i_{qcmd}^* - i_a^* - i_s^* \quad (14)$$

4. 재점착제어 시험

재점착제어 시험은 앞에서 설명한 추정 점착력에 의한 방법으로 6호선 시험선에서 실시하였다. 시험을 위한 차량편성은 그림4에 나타난 것처럼 4M4T로 구성된 열차편성으로 하였다. 살수는 M2차의 2번축에 대하여 우측에서 좌측으로 운전시 실시하였다.

그림5는 최대 가속운전시(4Notch) 재점착제어 시험과형이다. 공전검지 방법은 공전속도, 공전가속도 및 등가 차량가속도에 의한 검지 방법을 모두 적용하였다. 그림5에 원형으로 표시한 부분은 공전속도에 의하여 공전이 검지된 부분을 표시한 것이다. 차량속도가 증가하면서 공전속도도 점차적으로 증가한다. 그러나 공전가속도에 의한 검지는 공전속도의 증가 기울기가 작으면 검지를 하지 못하는 단

점이 있으므로 공전속도에 의한 검지 부분을 추가하면 공전 검지를 정확하게 할 수 있다.

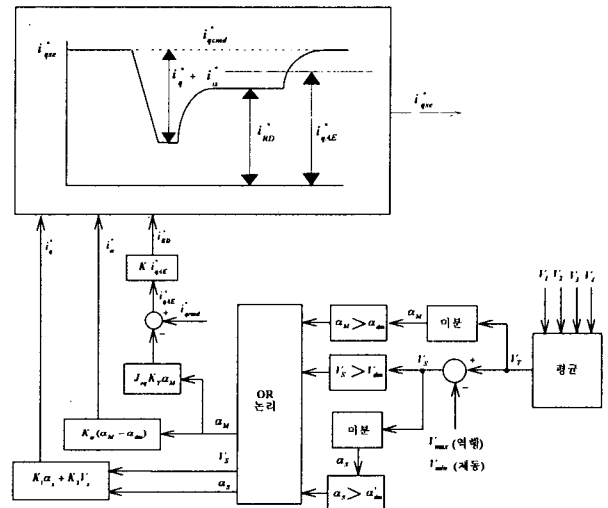
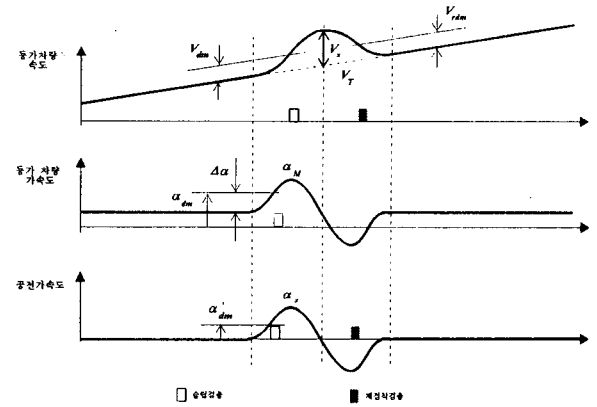


그림 3 추정점착력에 의한 재점착제어

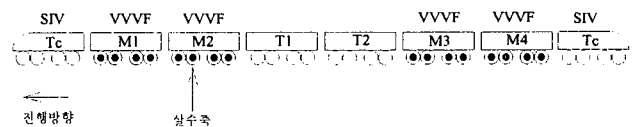


그림 4 6호선 차량구성

그림5에서 보는 것처럼 공전이 검지되면 전류 지령치를 공전속도, 공전가속도에 비례하여 감소시키고 재점착이 검지되면 전류지령치를 추정점착력에 의한 전류값의 80%까지 증가시킨다. 이때 재공전이 발생하지 않으므로 추정점착력의 값이 적절하게 선정된 것을 확인 할 수 있다. 그리고 공전이 검지된 지 일정시간 후에 원래의 전류지령치로 회복시킨다. 계속하여 살수되는 조건이므로 다시 공전을 검지하여 전류지령치를 감소하는 반복된 동작을 수행한다. 전류지령치의 변화에 따라 실제 전류치가 추종하여 변화하고, 추정점착전류로 회복시 재공전이 발생치 않으므로 재점착제어가 원활하게 이루어 짐을 확인할 수 있다.

그림 2는 공전이 회복될 때의 검지 알고리즘이다. 공전가속도 α_s , 공전속도 V_s 는 각각의 검지치 α_{rdm} , V_{rdm} 이하가 되면 공전이 회복된 것으로 간주하여 재점착제어를 수행하도록 하였다.

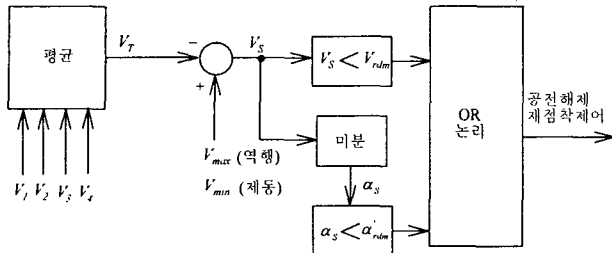


그림 2 공전회복검지 알고리즘

3. 추정점착력 제어

3.1 추정점착력 연산

점착력은 전동기의 토크 방정식에서 부하토크와 같다고 생각할 수 있다. 전동기의 토크 방정식은 식(1)과 식(2)와 같이 표현할 수 있다.

$$T_M = J_{eq} \frac{d\omega_M}{dt} + B\omega_M + \tau_L \quad (1)$$

$$T_M = J_{eq} \frac{d\omega_M}{dt} + B\omega_M + T_{AE} \quad (2)$$

여기서 T_M : 전동기 토크[N·m]
 J_{eq} : 전동기 한 대당 등가관성[kg·m²]
 ω_M : 전동기의 회전 각속도[rad/sec]
 τ_L : 부하토크[N·m]
 B : 전인부의 마찰계수[kg·m²/sec]
 T_{AE} : 점착력[N·m]

전동기의 토크는 식(3)과 같이 벡터제어가 완전하다면 전동기 상수와 d, q축 기준 전류로부터 계산할 수 있다.

$$T_M = \frac{3P}{4} \frac{L_m^2}{L_r} i_{dse}^* i_{qse}^* \quad (3)$$

식(3)을 q축 토크 기준전류에 대하여 정리하면 식(4)와 같이 정리할 수 있다.

$$i_{qse}^* = K_d \cdot T_M \quad (4)$$

여기서 $K_d = \frac{4 \cdot L_r}{3 \cdot P \cdot L_m^2 \cdot i_{dse}^*}$ 이다.

식(2)에 마찰계수(B)에 의한 성분은 무시하고, 양변에 K_d 를 곱하면 식(5)와 같이 표현할 수 있다.

$$T_M \cdot K_d = T_{AE} \cdot K_d + J_{eq} \frac{d\omega_M}{dt} \cdot K_d \quad (5)$$

식(5)을 추정점착전류 i_{qAE}^* 와 등가 차량속도 V_T [km/h]로 다시 표현하면 식(6)과 같이 표현된다.

$$i_{qAE}^* = i_{qse}^* - J_{eq} \cdot K_T \cdot \frac{dV_T}{dt} \quad (6)$$

여기서 i_{qse}^* 는 q축 토크 기준전류,

$$K_T = K_d \cdot \frac{R_g}{3.6 \cdot r_{wh}}$$

r_{wh} : 차량바퀴의 반경[m],

R_g : 전동기와 차량바퀴 사이의 기어비이다.

3.2 추정점착력에 의한 재점착제어

그림3은 공전시 점착제어 알고리즘을 나타내었다. 그림3과 같이 공전속도, 등가 차량가속도 및 공전가속도를 이용하여 공전을 검지한다. 공전을 검지하면 전인력을 감소시켜 공전이 발생하지 않도록 하고, 재점착이 검지 되면 추정된 점착전류를 이용하여 재점착제어를 수행한다. 식(2)를 점착력에 대하여 정리하면 식(7)과 같고, 이것을 전류에 관한 식으로 다시 표현하면 식(8)과 식(9)와 같다.

$$T_{AE} = T_M - J_{eq} \frac{d\omega_M}{dt} - B\omega_M \quad (7)$$

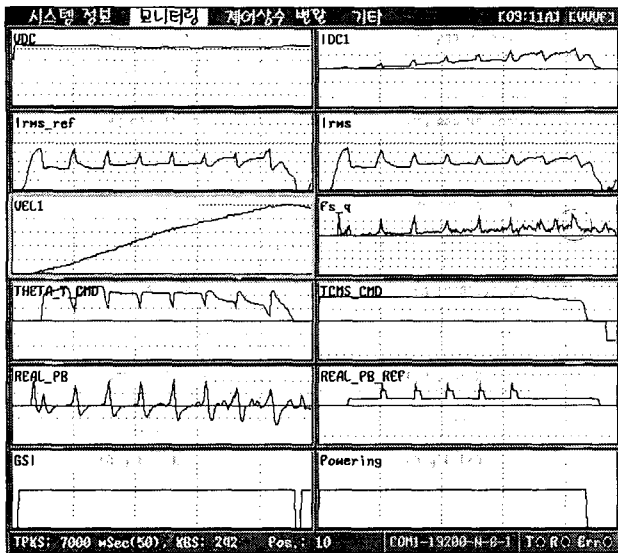
$$I_{AE} = I_M - K_1 \alpha_s - K_2 V_s \quad (8)$$

$$i_{qse}^* = i_{qcmd}^* - K_1 \alpha_s - K_2 V_s \quad (9)$$

즉 전동기 실효치 기준전류 I_M 및 토크 지령전류 i_{qcmd}^* 에서 공전이 발생한 양을 전류로 환산하여 감소시킨다. 감소분 전류 i_q^* 는 식(10)과 같이 다시 표현할 수 있다. 토크 기준전류 i_{qse}^* 의 값이 재점착 전류지령치 i_{RD}^* 값 보다 작도록 감소분전류 i_q^* 의 값을 설정한다.

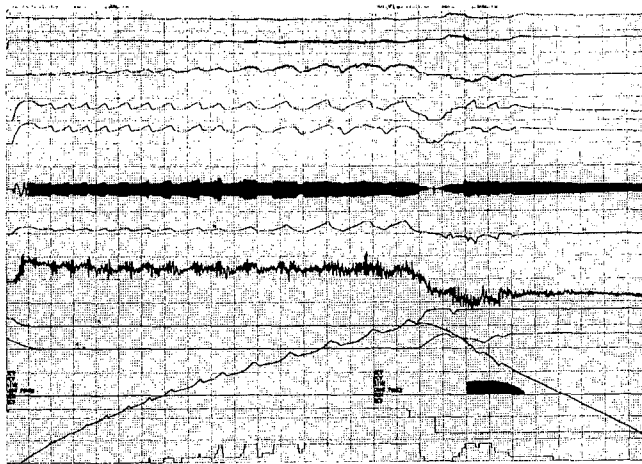
$$i_q^* = K_1 \alpha_s + K_2 V_s \quad (10)$$

여기서 i_q^* 공전에 의한 전류감소치이며, K_1 는 공전가속도 비례계인, K_2 는 공전속도 비례계인,



VDC : 캐패시터 전압, IDCl : 가선전류,
 Irms_ref : 전류지령치, Irms : 실효치 전류,
 VEL1 : 1축 속도, Fsq : 공전속도
 THETA_T_CMD : 공전시 전류 감소치
 TCMS_CMD : TCMS의 견인력 지령치
 REAL_PB : 공전가속도
 REAL_PB_REF : 공전검지 신호

그림 5 수동운전시 재점착제어(4N운전시)



①가선전압 [1000V/div] ②필터전압 [1000V/div]
 ③가선입력전류[600A/div] ④전류 지령치 [500A/div]
 ⑤실효치 전류 [500A/div] ⑥순시전류 [2000A/div]
 ⑦슬립주파수 [2.5Hz/div] ⑧가감속도[m/s²]
 ⑨차공기압[2.5kg/cm²/div] ⑩T차공기압[2.5kg/cm²/div]
 ⑪초퍼전류1000A/div] ⑫Notch/step
 ⑬차량속도 [10km/h/div] ⑭PWM Mode

그림 6 대공전시 재점착제어

그림6은 대공전이 발생하도록 1, 3축에 살수를 시작하면서 주행시험한 파형이다. 대공전이 발생하였을 때 등가 차량가속도에 의하여 공전을 검지하여 견인력을 감소시키고, 대공전이

해지되면 추정된 재점착 전류의 80% 정도로 토크 기준전류를 상승시킨다. 이 전류값에서는 대공전이 발생하지 않는다. 원래의 전류치로 상승하면 계속 살수되는 상태이므로 대공전이 발생하여 견인력을 다시 감소시킨다. 이러한 동작이 반복되면서 재점착제어가 수행되는 것을 확인할 수 있었다.

5. 결론

본 연구에서는 공전 발생시 공전검지 방법을 적용하는 기술에 대하여 정리하였고, 전동기 한 대당 등가 관성을 이용하여 견인부의 관성량과 차량속도 등 제어정보가 부족한 전동차량에 적용이 간단한 새로운 추정 재점착제어 방법에 대하여 제시하였다. 그리고 이 방법을 서울시 6호선 국산화 전동차(609편성) 및 광주 지하철 1호선에 적용하여 공전 발생시 감소전류를 패턴에 의한 제어방법보다 감소할 수 있었고, 공전 회복시 추정점착전류로 토크 전류 회복시 재공전이 발생치 않게 함으로써 재점착제어의 우수성과 안전성을 확인할 수 있었다. 결론적으로 효율적인 재점착제어를 수행하여 견인력의 감소를 적게 하여 운송효율을 증대할 수 있을 것으로 본다.

참고 문헌

- [1] T. Watanabe, A. Yamanaka, T. Hirose, K. Hosh, S. Nakamura, "Optimization of Readhesion Control of Shinkansen Trains with Wheel-Rail Adhesion Prediction", PCC-Nagaoka ICPE'97, pp47-50.
- [2] A. Yamanaka, T. Watanabe, M. Matsuoka, Y. Imamura, "Application of Anti-slip Readhesion Control with Presumed Adhesion Force to Commuter Transport Electric Cars", T. IEE Japan, Vol. 119-D, No.6, pp825~836, 1999.
- [3] Yosuke Takaoka, Atsuo Kawamura, "Disturbance Observer Based adhesion Control for Shinkansen", AMC2000-NAGOYA, pp169~174, 2000.
- [4] A. Kawamura, K. Takeuchi, T. Furuya, Y. Takaoka, K. yoshimoto, M. Cao, "Measurement of the Tractive Force and the New Adhesion Control by the Newly Developed Tractive Force Measurement Equipment", PCC-Osaka 2002, pp879~884, 2002.