

최대점착력 추정을 이용한 철도차량의 재점착제어 성능 개선

김 우석, 김 용석, 설 승기
 서울대학교 전기공학부 전력전자 연구실

Improvement of Re-adhesion Control Performance
 Using Estimation of Maximum Adhesive Force

Woo-Seok Kim, Yong-Seok Kim, Seung-Ki Sul
 School of Electrical Engineering, Seoul National University
 E-mail : kwoos@eepel.snu.ac.kr Web : http://eepel.snu.ac.kr

Abstract - In this paper, an improved re-adhesion control scheme is proposed for 1C4M(1-Controller 4-Motors) traction system. It is well known that the coefficient of adhesion between wheel and rail has a maximum value at a certain slip velocity. In the proposed scheme, maximum adhesive force is estimated by an observer and the driving torque of motor is controlled to get maximum adhesive force. The simulation results are presented.

2. 본 론

2.1 철도차량 견인 시스템의 모델링

2.1.1 철도차량 견인 시스템의 수학적 모델링

견인시스템은 전동기의 토크방정식과 차량의 운동방정식으로 표현할 수 있다. 이들 두 방정식은 차량바퀴와 선로 사이의 마찰력에 의해서 분리될 수 있다. 즉 마찰력은 전동기 측면에서는 부하토크로서 취급되고, 차량의 측면에서는 견인력으로서 취급된다. 결국 전동기 측면에서의 부하토크의 크기와 차량 측면에서의 견인력의 크기는 같다.

그림1은 차량바퀴와 선로 사이의 관계를 나타낸 것이다. 그림에서 차량바퀴 축과 전동기 축은 감속기어를 통해 연결된다.

1. 서 론

일반적으로, 철도차량에서는 1C4M 시스템이 사용된다. 1C4M은 하나의 인버터로 네 대의 전동기를 구동하는 시스템이다. 이러한 시스템은 경제적인 장점이 있는 반면, 제어가 어려운 단점이 있다.

최근에 철도차량은 고속화 및 경량화 되고 있다. 따라서 철도차량에서 재점착제어의 필요성은 더욱 커지고 있다. 차량바퀴의 공전현상은 바퀴와 선로 사이의 점착력이 갑자기 변할 때 흔히 발생한다. 공전은 바퀴와 선로 표면의 마모, 기어 톱니의 손상 및 부품수명 단축의 원인이 된다. 더욱이 공전은 차량의 견인력을 감소시킨다. 따라서 재점착제어의 목적은 바퀴와 선로 사이의 공전을 방지하여 견인력을 향상시키고 차량의 수명을 연장시키는 것이다.

전력용 반도체소자의 발달 및 디지털 신호 프로세서(DSP)의 성능 향상은 유도전동기 토크의 순시적인 제어 가능하게 한다. 재점착제어는 전동기 토크를 제어하여 수행되기 때문에, 순시적인 토크 제어는 재점착제어의 성능 향상에 기여한다. 근래 순시적인 토크 제어를 위하여 백터제어(FOC)가 널리 사용되고 있다.

기존의 재점착제어는 공전현상을 바로잡을 수는 있었지만 점착력을 최대로 이용할 수 없었다[1~4]. 따라서 재점착제어의 성능이 떨어진다. 본 논문에서는 공전의 방지는 물론, 점착력을 최대로 이용할 수 있는 제어 알고리즘을 제안한다. 일반적으로 각기 다른 환경에서의 점착계수는 각각 다른 특정한 공전속도에 대하여 각각의 최대점을 갖고 있다. 제안된 재점착제어에서는 관측기를 통해 최대점착력을 추정한다. 그리고 이러한 최대점착력에서 점착력이 유지되도록 전동기의 구동력을 제어한다. 최근 관측기를 통하여 재점착제어를 수행한 논문이 있다[5,6]. 그러나 이들 논문은 컴퓨터로 시뮬레이션만을 시행하여 실질적인 성능을 확인할 수 없었다. 본 논문에서는 제안된 제어기법의 성능을 평가하기 위하여 먼저 Matlab의 Simulink를 통해 시뮬레이션을 수행하고, 또한 1C4M 시스템의 축소모형을 설계·제작하여 실험을 행한다.

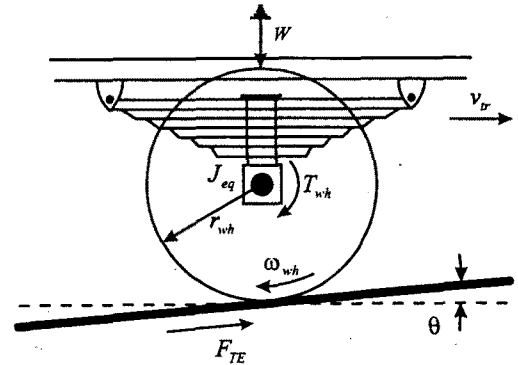


그림1. 차량바퀴와 선로 사이의 관계.

여기서, $T_{wh} = T_M \cdot R_g$, $\omega_{wh} = \frac{\omega_M}{R_g}$

전동기에서 발생한 구동력은 감속기어를 거쳐 차량바퀴의 축에 전달된다. 차량의 무게는 차량바퀴 축에서 본 하나의 등가관성으로 환산할 수 있다. 따라서 전동기의 토크방정식은 전동기 회전속도에 대해 일차 미분방정식으로 표현된다.

$$T_M = J_{eq} \frac{d\omega_M}{dt} + F_{AE} \frac{r_{wh}}{R_g} + B \cdot \omega_M \quad (1)$$

여기서, T_M : 전동기 토크 [$N \cdot m$],

F_{AE} : 점착력 [N],

ω_M : 전동기 회전각속도 [rad/sec],

J_{eq} : 전동기 한 대당 등가관성 [$kg \cdot m^2$],

B : 마찰계수 [$kg \cdot m^2/sec$],

r_{wh} : 차량바퀴의 반경 [m],

R_g : 전동기와 바퀴 사이의 기어비이다.

그리고 차량의 운동방정식은 다음과 같이 표현된다.

$$M \frac{dv_{tr}}{dt} = F_{TE} - R_t(v_{tr}) - Mg \cdot \sin \theta \quad (2)$$

여기서, v_{tr} : 차량속도 [m/sec],

F_{TE} : 견인력 [N], ($F_{TE} = F_{AE}$),

R_t : 차량운동에 대한 저항력 [N],

M : 차량질량 [kg], g : 중력가속도 [m/sec²],

θ : 선로의 기울기 [kg·m²/sec²]이다.

그림2는 철도차량 견인시스템을 모델링한 블록도이다.

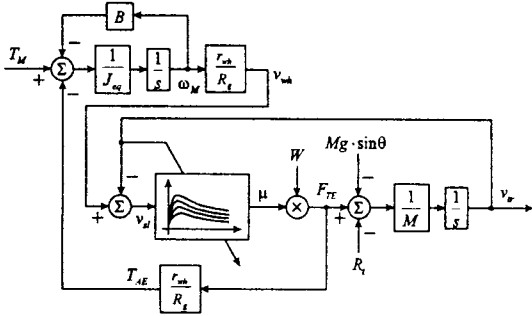


그림2. 철도차량 시스템의 모델 블록도.

점착력을 정확하게 구하기는 대단히 어렵다. 왜냐하면 점착계수는 차량바퀴와 선로 사이의 여러 환경·조건에 따라 민감하게 변하는데, 이러한 점착계수는 최대점착력의 상한값을 결정하기 때문이다. 말하자면, 최대점착력은 점착계수 및 바퀴와 선로의 접촉면에서의 수직항력과 꺾에 비례한다.

$$F_{AE} \leq \mu \cdot W = \mu \cdot Mg$$

(3)

여기서, W : 차량의 무게 [kg·m/sec²],

μ : 점착계수이다.

전동기가 역행(力行)할 경우에는 바퀴의 선속도가 차량속도보다 빠른 반면, 회생(回生)할 경우에는 차량속도가 바퀴의 선속도보다 빠르다. 공전속도는 차량바퀴의 선속도와 차량속도와와의 차이 절대값으로 정의한다.

$$v_{sl} = |\omega_{wh} \cdot r_{wh} - v_{tr}| = \left| \frac{\omega_M \cdot r_{wh}}{R_g} - v_{tr} \right| \quad (4)$$

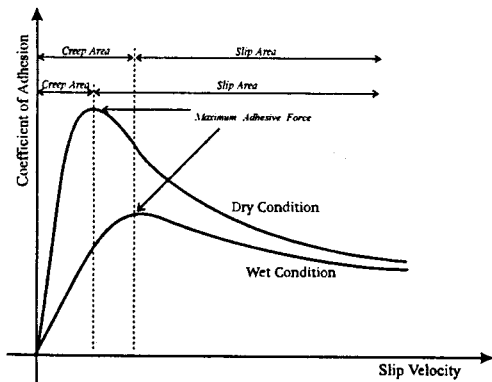


그림3. 공전속도와 점착계수의 관계.

그림3은 선로 표면이 건조한 상태일 경우와 젖은 상태일 경우의 공전속도에 대한 점착계수의 일반적인 관계를 나타낸 것이다. 각 경우에서의 점착계수는 공전속도에

따라 크립(Creep)영역, 공전영역 및 최대점착력으로 특징지어진다. 공전영역은 차량바퀴와 선로 사이에 실질적인 공전현상이 발생하는 영역으로서, 이 영역에서는 바퀴와 선로 등의 손상이 발생하고 제어가 불안정해진다. 반면, 크립영역은 차량바퀴 및 선로가 탄력적인 변형상태를 유지하는 영역으로서, 공전영역과는 달리 제어가 안정적이다. 그리고 공전영역과 크립영역 사이에는 최대점착력이 존재하게 되는데, 이 부근에서는 견인력을 최대로 사용할 수 있다.

2.1.2 축소모형의 제작

그림4는 1C4M 철도차량 시스템의 공전/활주 실험을 위한 축소모형이다. 축소모형의 크기는 가로, 세로, 높이다.

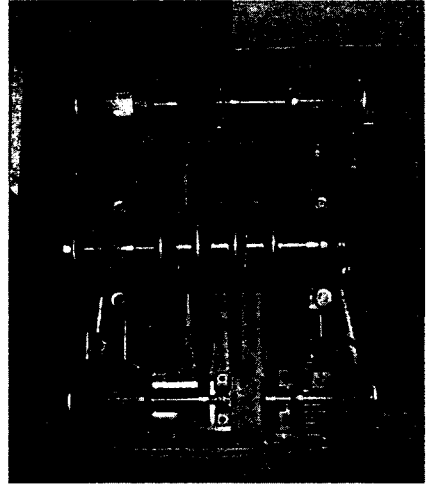


그림4. 1C4M 철도차량의 공전/활주 실험용 축소모형. (위: 평면사진, 아래: 측면사진)

대표적인 국내 철도차량 시스템은 5M5T(5 Motor Cars and 5 Trailer Cars)로 이루어진다. 하나의 전동기 차량에는 4대의 전동기가 부착되어 있으므로, 결국 하나의 철도차량 시스템은 전부 20대의 전동기로 구성된다. 각각의 전동기는 정격 토크 1100 [N·m], 정격 출력전력 240 [kW]이다. 그리고 전동기 한 대당 감당하는 차량의 등가관성은 93.66 [kg·m²]이다.

축소모형을 설계하기 위하여 전동기 한 대당 감당하는 등가관성, 차량 무게에 의한 수직항력, 정격 출력전력

및 정격 토크는 일정한 비율로 축소하였다. 그리고 전동기의 회전각속도에 대한 차량바퀴의 선속도의 비는 같도록 설계하였다. 축소모형은 1MIT를 모델링한 것이다. 축소모형에 사용된 전동기는 정격 토크 4.1 [N·m], 정격 출력전력 0.75 [kW]이고, 전동기 한 대당 감당하는 등가관성은 0.3 [kg·m²]이다.

2.2 기존의 재점착제어

2.2.1 공전검지 및 패턴에 의한 재점착제어(1)

공전검지 및 패턴(Pattern)에 의한 재점착제어는 공전속도 혹은 공전가속도가 공전검지 기준치를 초과하면 공전을 인식하여 일정한 패턴으로 전동기의 구동력을 감소시키고, 그후 공전속도 혹은 공전가속도가 재점착검지 기준치보다 작아지면 다시 원래의 구동력을 회복하는 방식이다.

그림5는 구동력 감소 및 회복의 몇가지 패턴을 나타낸 것이다.

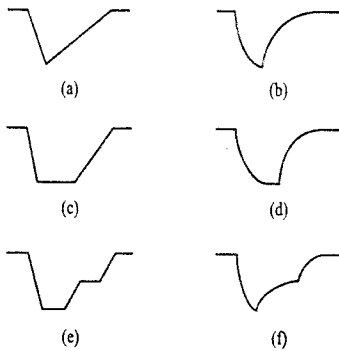


그림5. 구동력 감소 및 회복 패턴의 예.

이러한 재점착제어는 재점착을 위한 견인력의 손실이 다소 크고, 감소된 마찰력이 회복되지 않은 경우에도 구동력을 원래의 상태로 회복하기 때문에 재(再)공전의 가능성이 항상 존재한다. 그러므로 구동력의 감소 및 회복을 반복 수행하게 되고, 그에 따라 견인력에 리플(Ripple)이 발생하여 승차감을 저하시킨다.

2.2.2 퍼지논리를 이용한 재점착제어(2,3,4)

퍼지논리(Fuzzy Logic) 제어는 불확실한 시스템을 다루기에 적합하다. 차량바퀴와 선로 사이의 점착력은 외부환경에 따라 비선형적인 특성을 가지기 때문에 점착력을 제어하기가 어렵다. 그러므로 퍼지논리를 이용한 재점착제어는 점착력을 안정적으로 제어할 수 있다.

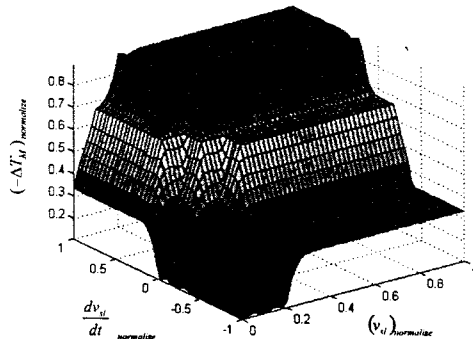


그림6. 공전속도, 공전가속도 및 구동력 감소량과의 관계

그림6은 두 개의 입력과 한 개의 출력과의 관계를 나타낸 것이다. 여기서 입력은 공전속도와 공전가속도이고 출력은 전동기 구동력의 감소량이다.

일반적으로 선로 표면의 환경에 따라 공전속도에 대한 최대점착력의 위치가 달라진다. 따라서 고성능의 퍼지논리 제어를 위해서는 외부환경의 변화에 따라 소속함수를 변경시켜 주어야한다. 결국 점착력이 항상 최대가 되는 것은 불가능하다.

2.3 제안된 재점착제어

2.3.1 관측기에 의한 점착력의 추정

점착력을 직접 측정하는 것은 대단히 어렵다. 그러므로 관측기를 통하여 점착력을 추정하는 방법을 고려한다. 전동기 측면에서 점착력은 부하토크로서 취급되어진다. 식(1)에서 알 수 있듯이, 점착력은 전동기 속도 및 전동기 토크에 관한 식으로 표현된다.

$$\frac{d}{dt} \begin{bmatrix} \hat{\theta}_M \\ \hat{\omega}_M \\ \hat{F}_{AE} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 \\ 0 & -\frac{B}{J_{eq}} & -\frac{r_{wh}}{J_{eq} \cdot R_g} \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \hat{\theta}_M \\ \hat{\omega}_M \\ \hat{F}_{AE} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ \frac{1}{J_{eq}} \\ 0 \end{bmatrix} T_M + \begin{bmatrix} k_1 \\ k_2 \\ k_3 \end{bmatrix} [\theta_M - \hat{\theta}_M] \quad (5)$$

식(5)로부터 전달함수의 특성방정식을 구한다.

$$s^3 + \left(k_1 + \frac{B}{J_{eq}}\right)s^2 + \left(k_2 + \frac{k_1 B}{J_{eq}}\right)s - \frac{k_3 r_{wh}}{J_{eq} R_g} = 0 \quad (6)$$

적절한 근을 설정하기 위하여 특성방정식이 ITAE 전달함수가 되도록 한다.

$$s^3 + 1.75\omega_n s^2 + 2.15\omega_n^2 s + \omega_n^3 = 0 \quad (7)$$

결국, [k₁ k₂ k₃]은 다음과 같다.

$$\begin{bmatrix} k_1 \\ k_2 \\ k_3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1.75\omega_n - \frac{b}{J_{eq}} \\ 2.15\omega_n^2 - 1.75\frac{B}{J_{eq}}\omega_n + \left(\frac{B}{J_{eq}}\right)^2 \\ -\frac{J_{eq} R_g}{r_{wh}} \omega_n^3 \end{bmatrix} \quad (8)$$

2.3.2 최대점착력에서의 구동력 제어

일반적으로 공전속도에 대한 점착계수는 하나의 최대점이 존재한다고 알려져있다. 이러한 최대점에서는

$$\frac{dF_{AE}}{dv_{sl}} = 0 \text{ 인 관계가 성립한다. 즉 공전속도에 대한}$$

점착력의 극대점을 구한다.

공전속도에 대한 점착력의 미분은 다음과 같다.

$$\frac{dF_{AE}}{dv_{sl}} = \frac{dF_{AE}}{dt} / \frac{dv_{sl}}{dt} \quad (9)$$

식(9)를 통해 구한 공전속도에 대한 점착력의 미분값으로부터 새로운 공전속도 지령치를 계산한다.

$$(v_{sl}^{k+1})_{ref} = (v_{sl}^k)_{ref} + \alpha \frac{dF_{AE}^k}{dv_{sl}^k}$$

(10)

여기서, α는 양의 상수값으로 설정한다.

따라서 전동기 속도의 지령치는 다음과 같이 계산한다.

$$(\omega_M)_{ref} = \frac{R_g}{r_{wh}} [v_{tr} + (v_{sl})_{ref}]$$

(11)

그림7은 제안된 재점착제어의 제어 블록도를 나타낸 것이다.

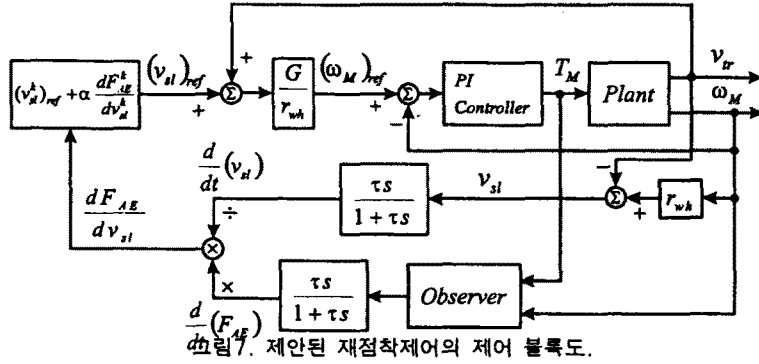


그림 7. 제안된 재점착제어의 제어 블록도.

2.4 시뮬레이션 결과

시뮬레이션에서 공전속도와 점착계수의 관계는 그림 3과 같다고 가정하고, 특히 최대점착력은 선로표면이 건조할 경우에는 0.8 [km/h] 근처이고 젖었을 경우에는 1.2 [km/h] 근처라고 가정한다. 그리고 처음 10초 동안은 건조한 선로를, 다음 10초 동안은 젖은 선로를, 마지막 10초 동안은 다시 건조한 선로를 달린다고 가정하였다. 또한 전동기의 구동력은 순시적으로 제어할 수 있다고 가정하였다.

2.4.1 공전검지 및 패턴에 의한 재점착제어

그림 8은 공전검지 및 패턴에 의한 재점착제어의 시뮬레이션 결과이다. 여기서 구동력 감소 및 회복은 모두 선형적으로 수행하였다. 그림 8에서 알 수 있듯이, 젖은 선로 상에서 운전할 때 재공전 현상이 발생하였다.

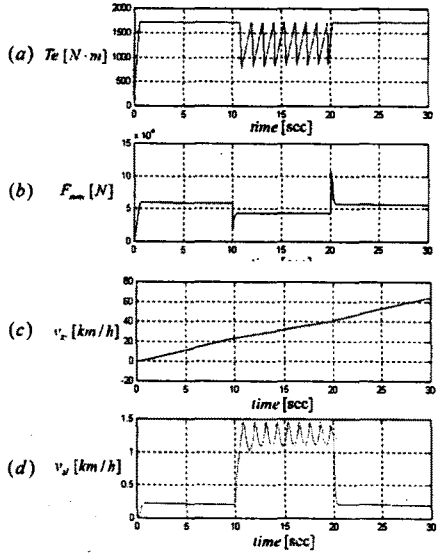


그림 8. 패턴에 의한 재점착제어 시뮬레이션 결과. (a)전동기 토크, (b)점착력, (c)차량속도, (d)공전속도.

2.4.2 퍼지논리를 이용한 재점착제어

그림 9는 퍼지논리를 이용한 재점착제어의 시뮬레이션 결과이다. 패턴에 의한 재점착제어와는 달리 재공전현상은 발생하지 않았지만, 전동기의 구동력이 최대점착력 근처에서 운전되지는 않았다.

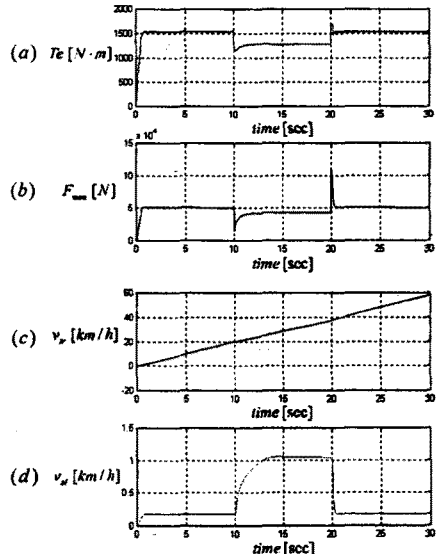


그림 9. 퍼지논리를 이용한 재점착제어 시뮬레이션 결과. (a)전동기 토크, (b)점착력, (c)차량속도, (d)공전속도.

2.4.3 제안된 재점착제어

그림 10은 제안된 재점착제어의 시뮬레이션 결과이다. 그림에서 보듯이, 최대점착력 근처에서 전동기 구동력이 제어된다.

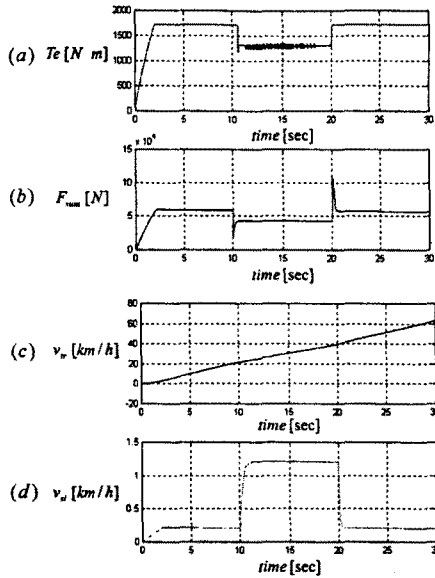


그림10. 제안된 재점착제어 시뮬레이션 결과.
(a)전동기 토크, (b)점착력, (c)차량속도, (d)공전속도.

3. 결 론

제안된 재점착제어 기법의 우수성을 보이기 위하여 시뮬레이션을 수행하였다. 관측기를 통하여 최대점착력을 구하고 이러한 최대점착력 근처에서 전동기의 구동력을 제어할 수 있었다.

제안된 방식에서는 공전점지 및 패턴에 의한 재점착제어에서 흔히 나타나는 재공전이 전혀 발생하지 않았을 뿐만 아니라, 퍼지논리를 이용한 재점착제어에서의 문제점이었던 환경의 변화에 따른 구동력의 손실도 거의 없었다.

현재 축소모형을 통하여 제안된 재점착제어 알고리즘의 실제성능을 시험 중에 있다.

[참 고 문 헌]

- [1] 서광덕, "점착력 추정에 의한 고능률 재점착제어", 서울대학교 대학원 공학박사학위논문, pp.50-56, 1994년 11월
- [2] R.J.Hill and J.-F. de la Vssiere, "A Fuzzy Wheel-Rail Adhesion Model for Rail Traction", EPE97, Vol.3, pp.416-419, 1997
- [3] Sumiko Kita, Masayoshi Kumano, and Takahiro Kikuchi, "Development of Fuzzy Adhesive Control System", JIASC 95, Vol.2, pp.269-272, 1995
- [4] F. Brondolo, P. Ferrari, M. Marchesoni, and L.Puglisi, "Optimised Fuzzy Algorithm to Control Adhesion Conditions during Strategy in AC Drives for Traction Applications", EPE97, Vol.2, pp.426-431, 1997
- [5] Yoshiki Ishikawa and Atsuo Kawamura, "Maximum Adhesive Force Control in Super High-Speed Train", PCC-Nagaoka97, pp.951-954, 1997
- [6] 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", JIASC 98, Vol.1, pp.229-234, 1998