

# 전동차 점착특성 추정에 관한 연구

## A Study on Deducting Adhesion Characteristic of Urban Train

김길동\* 이한민\*\* 오세찬\*\*\* 이장무\*\*\*\* 박성혁\*\*\*\*\*  
Kim, Gil Dong Lee, Han Min Oh, Seh Chan Lee, Chang Mu Park, Sung Hyuk

---

### ABSTRACT

It is one of the most effective methods for improving the performance of electric railway vehicles to make better the wheel-rail adhesion characteristics. To study adhesion characteristic is to develop the equivalent reduction machine to experiment on the adhesion system. The experiment system makes it possible to change the wheel-rail adhesion force with various adhesion parameters, and therewith to test the adhesion control system with the reduction machine in a laboratory. In this paper, for improving adhesion performance shows actually control methods.

---

### 1. 서론

본 연구는 견인전동기와 같이 광범위한 속도제어범위를 갖는 유도전동기의 구동에 벡터제어를 도입하고 등가의 실험장치에 의하여 점착제어에 관한 실험을 하였다. 인버터는 전력반도체소자가 낮은 변조율부터 180도 구간을 연속통전하는 범위까지 사용하는 PWM변조방법을 응용하였다. 저속영역에서 토오크의 맥동과 전류파형에 영향을 주는 데드타임에 대한 보상은 낮은 스위칭 주파수를 사용하고 순시전류를 제어하는 루프를 두어 좋은 보상결과를 얻었다. 전동기의 구동실험에 있어서는 정지할 때까지 회생제동이 가능함을 확인하였으며 벡터제어가 갖는 효과적인 결과를 확인하였다. 재점착제어에 있어서는 일반적으로 사용되는 공전속도의 1차지연에 의한 토오크의 감소방법을 사용하고, 공전속도에 비례하여 토오크를 낮추는 속도제어루프를 첨가하였다. 1차 지연만을 사용하여 토오크를 감소시키는 방법과 비교하여 속도제어 루프가 추가되었을 때, 같은 조건에서 공전속도의 크기가 감소하고 가속도가 커짐이 관찰되었으며 점착특성을 향상시킬 수 있는 방법임을 실험으로 확인하였다.

### 2. 견인전동기의 구동

벡터제어는 슬립주파수형의 간접벡터방법을 적용한다. 차량에 적용하는 인버터는 180도 통전상태인 과변조에서도 사용되어야 한다. 이 때에는 전압의 위상과 주파수만을 가변할 수 있으므로 일반적으로 적용되는 전류제어정보는 전압형의 적용을 하도록 한다. 견인전동기는 그림 1의 방법에 의하여 구동하였다.

벡터의 표현에서 동기속도로 회전하는 직각좌표로 연산된 전압벡터를 극좌표에 의한 형식으로 변환하고  $r < 1$ 의 영역에서는  $r$ 에 비례하여 전압을 출력하는 특성을 갖도록 변조기를 설계한다. 극좌표로 표현한 전압벡터의 크기는 변조율에 관계하므로 전력반도체 소자가 180[도]를 연속통전하는 최소의 벡터가 있게 된다.

---

\* 한국철도기술연구원 도시철도기술개발사업단

E-mail : [gdkim@krri.re.kr](mailto:gdkim@krri.re.kr)

TEL : (031)460-5710 FAX : (031)460-5749

\*\* 한국철도기술연구원 도시철도기술개발사업단, E-mail : [hanmin@krri.re.kr](mailto:hanmin@krri.re.kr)

\*\*\* 한국철도기술연구원 도시철도기술개발사업단, E-mail : [soh@krri.re.kr](mailto:soh@krri.re.kr)

\*\*\* 한국철도기술연구원 도시철도기술개발사업단, E-mail : [cmlee@krri.re.kr](mailto:cmlee@krri.re.kr)

\*\*\* 한국철도기술연구원 도시철도기술개발사업단, E-mail : [shpark@krri.re.kr](mailto:shpark@krri.re.kr)

이 경우가  $r=1$ 의 상태이며 자속제어기는 전동기의 전압벡터가 이 최소의 크기일 때를 기준으로 하는 비례 적분제어기를 사용하였다. 변조율이  $r < 1$ 의 영역에 있어서 전동기의 전압벡터에 대하여 그림 1에 대한 자속의 제어와 궤환은 정격자속이 되도록 인버터의 선형동작 영역에서는 자속제어기가 포화하도록 한다.

벡터연산은 자속벡터를 기준축으로 하여 1차전압을 연산하는 일반적인 방법을 사용하였으며 전동기의 설정토크와 자속에 의하여 벡터연산에 필요한 자속성분의 전류와 토크성분의 전류 및 슬립을 설정한다. 또 토크전류의 오차에 의한 슬립을 보상하는 슬립제어를 한다.

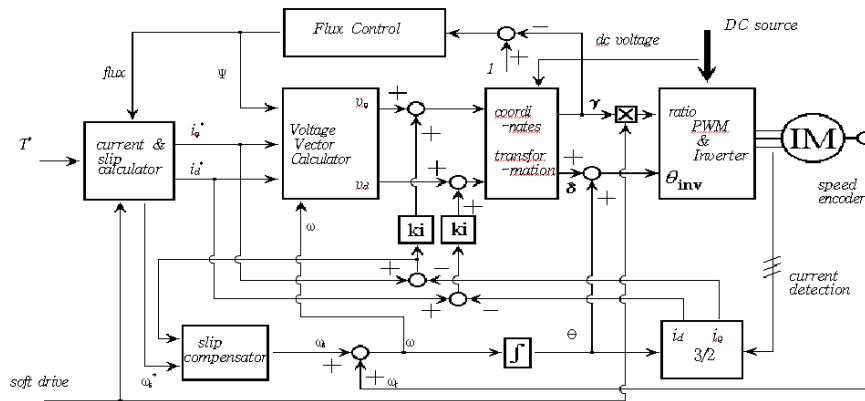


그림 1. 견인전동기의 벡터제어

### 3. 점착시스템

#### 3.1 점착계수

공전발생시의 점착계수에 대하여 다음과 같은 가정을 사용한다.

- 점착계수는 공전발생전이 가장높다. ( $\mu_y$ )
- 점착계수는 공전의 발생과 동시에 어느정도 저하한다. ( $\Delta\mu$ )
- 점착계수는 공전속도에 대하여 비례하여 감소한다. ( $-\rho \cdot v_s$ )

이들 결과를 근거로 식(1)과 그림 2와 같은 간단한 근사 모델을 적용한다.

$$\mu_s = \mu_y - \Delta\mu - \rho \cdot v_s \quad (1)$$

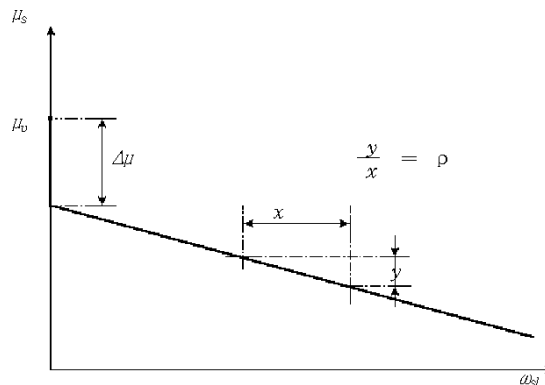


그림 2. 점착계수

또한 공전속도와 전동기의 토크에 대한 운동방정식은 식(2)와 같이 표현된다.

$$\frac{dv_s}{dt} = \frac{1}{\tau_m} v_s + \frac{\Delta\mu}{\rho\tau_m} + \frac{r}{J}(T - T_0)$$

여기에서,

$v_s$  : 공전속도[m/s](차륜과 레일의 상대속도)

$J$  : 차륜축의 합성 관성모멘트[Nm · s<sup>2</sup>/rad]

$\tau_m$  : ( $J/r^2 g \rho W$ ) 차륜의 기계적시정수

$r$  : 차륜반경[m]

$T$  : 차륜의 원주 토크[Nm]

$T_0$  : ( $r g u_r W$ ) 공전직전의 토크 이다.

### 3.2 재점착특성

차륜의 재점착은 차륜의 운동방정식에서 공전속도  $v_s$  를 0으로 함으로써 얻을 수 있다. 재점착을 위하여 공전속도를 검출하여 식(2)에 대한 토크를 제어하는 경우 공전속도  $v_s$  에 비례하는 제어량으로 차륜의 토크를 감소시키는 방법은 재점착을 얻을 수 없다고 알려져 있다. 재점착을 얻기위하여 사용되고 있는 방법으로는 토크를 감소시키는 제어량을 전기적시정수  $\tau_e$ 에 상당하는 일차지연을 도입한다. 공전속도는 검출이 가능한 것으로 가정하고 주전동기의 토크를 공전속도  $v_s$  에 대하여  $\tau_e$ 의 시간지연을 갖는 토크의 제어량을 제어하여 점착시스템이  $v_s$  를 0으로 하는 응답을 얻게하는 점착특성을 얻는다. 응답특성은  $v_s$  에 대한 1차지연의 시정수  $\tau_e$ 와 케환이득의 2가지에 의하여 변화하며 재점착의 존재여부를 판단하여 그 크기를 정한다.

## 4. 점착제어

식(2)의 공전속도에 대한 1차지연을 갖는 토크의 제어는 지연의 정도, 케환이득 및 점착시스템의 조건에 따라 여러응답을 보일 수 있으나 재점착을 이루는 조건은 공전이 발생한 시점을 기준으로 공전속도가 0이 되는 조건의 유무로 재점착을 판단할 수 있다.

본 연구에서는 두가지의 토크제어를 사용하였으며 우선 재점착을 얻기 위하여 식(3)과 같은 1차지연을 갖는 토크의 제어기능을 사용한다. 이것은 재점착을 위하여 알려진 일반적인 방법이며 비례상수  $K$ 와 시정수  $\tau_e$ 의 적절한 선정으로 재점착의 특성을 갖도록 한다.

$$T_1 + \tau_e \frac{dT_1}{dt} = -K v_s \quad (3)$$

$$T_2 = -K_s v_s \quad (4)$$

$$T - T_0 = T_1 + T_2 \quad (5)$$

다음의 제어기능은 식(4)와 같이 공전속도를 제어하는 루프를 첨가하여 재점착특성의 개선을 기대한다. 근본적으로 공전속도에 비례한 토크의 감소는 공전속도의 크기를 제어하게 된다.

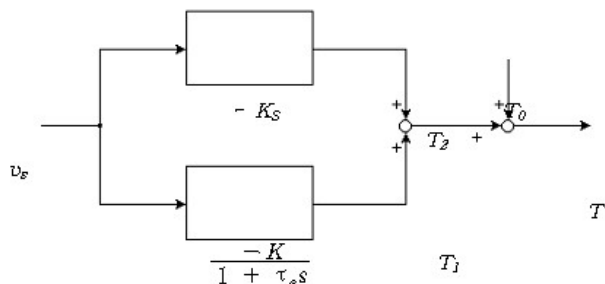


그림 3. 토크의 제어

본 연구에서 사용한 제어방법은 식(3)과 식(4)에 의한 토오크를 제어하며 식(5)와 같이 하여 식(2)에 제환한다. 견인전동기의 토오크를 공전속도의 제어와 1차지연에 의하여 제안된 토오크제어 방법은 그림 3에 나타내었다.

제안한 제어방법으로 점착제어를 할 경우 점착시스템은 식(2), 식(3), 식(4) 및 식(5)에 의하여 식(6)과 같은 점착시스템의 방정식으로 변형된다.

$$\tau_m \tau_e \frac{d^2 v_s}{dt^2} + (\tau_m - \tau_e + \frac{K_s r}{J} \tau_m \tau_e) \frac{dv_s}{dt} + (\frac{(K + K_s) r}{J} \tau_m - 1) v_s = \frac{\Delta \mu}{\rho} \quad (6)$$

식(6)의 응답에 대하여

$$\frac{(K + K_s) r}{J} \tau_m - 1 \leq 0 \quad (7)$$

의 경우에는 재점착의 기회가 부여되지 않는 조건이며 제환이득이 클 수록 전동차의 재점착의 기회가 있다는 것을 뜻한다.  $K_s = 0$ 일 때 1차지연만에 의한 재점착방법이므로 속도제환루프는 재점착성을 갖는다고 볼 수 있다.

$$\tau_m - \tau_e + \frac{K_s r}{J} \tau_m \tau_e \quad (8)$$

이것은 (+), (-) 및 0 에서도 재점착하는 조건이 있지만 기계적 시정수와 전기적 시정수의 대소관계도 재점착 성능의 중요한 요소 임을 나타내고 있다. 또 (-) 일때에 비해서 (+)의 경우가 재점착 영역이 작게 된다.  $K_s = 0$ 일 때 식(8)에 대하여  $\tau_e$ 의 선택으로 재점착성능을 결정하므로 토오크의 1차지연의 선정이 매우 중요하다. 그러나 속도제어루프의 이득  $K_s$ 는 1차지연과 함께 점착시스템의 응답에 관여하고 있다.

재점착시스템은 공전속도의 1차지연과 지연시정수 이외에 속도제환이득을 함께 고려해서 토오크를 제어하는 제어계를 설계하여 적용하므로써 개선된 재점착성을 기대할 수 있다.

## 5. 실험장치

실제차량의 경우 5M5T이고 만차의 경우 540[ton]의 중량을 갖고 구동축의 차륜이 860[mm]라고 할 때 견인전동기 1대당의 관성은 전동기축으로 환산했을 때 대략 100[Nm·s<sup>2</sup>/rad]이 된다. 실험장치의 경우 감속기어비와 축소율을 고려하여 차량에 해당하는 등가 관성체는 70[Nm·s<sup>2</sup>/rad]의 관성을 갖도록 하였다. 차륜관성은 차량의 관성과 30 : 1의 비율로 정하였다.

실험장치는 견인전동기(200kW) 1대에 대하여 150분의 1로 축소된 등가의 장치로 설계되었다. 전동기는 산업용의 유도전동기를 사용하였다. 차륜과 레일은 차륜 자체의 관성을 가지고 있으며 레일과 미끄러지는 운동을 하는 시스템이다. 실제와 등가인 실험장치는 차량관성체와 전동기축과의 사이에 차륜관성이 있고 미끄러짐을 갖는 장치가 되어야 한다. 실험장치는 그림 4와 같은 구조로 하였고 전자클러치의 사용가능한 상대속도가 500[rpm] 이내이기 때문에 차륜관성과 클러치사이에 10 : 1의 감속비를 갖는 감속기어를 사용하였다.

## 6. 실험

그림 1의 벡터제어에서 전동기는 정수선정이 되어야 한다. 본 연구에서는 전압을 기준으로 하여 전압강하율을 사용한 연산을 하였으며 자속과 유기기전력, 전류와 슬립 및 권선저항과 전류의 제환율들을 실험에 의하여 이들의 비율을 선정하였다. 제어 프로그램은 이들의 값을 변경하여 실험할 수 있도록 하였다. 정수선정을 위한 실험에 있어서 요구되는 전압의 크기가 되도록 자속과 유기기전력의 비율을 정하고 전류와 슬립 및 토오크의 비례관계를 선정한다. 저속에서 저항강하율과 전류제환의 이득을 정하며 반복적인 실험을 통하여 전류의 크기와 파형 및 토오크를 관찰하여 전동기의 정수에 관련한 비율을 정하였다.

### 6.1 점착제어

공전속도를 제한하여 얻어지는 효과를 관찰하기 위하여 우선 1차 지연필터에 의하여 실험하였으며 그림 4와 같은 응답이 측정되었다. 지연필터의 시정수를 임의로 하여  $\tau_e$  를 2[sec]로 하였으며 필터의 이득  $K$ 를 조절하여 실험을 하였다. 필터의 이득이 커질수록 슬립속도의 크기가 작아짐을 관찰되었고 토오크의 감소량이 커짐을 볼 수 있었다. 효과적인 재점착제어는 공전속도의 크기도 제어방법의 성능을 평가하는 한가지 요소이나, 토오크의 감소량은 가속성능을 좌우하는 매우 중요한 요소로 관찰되었다. 그림 4의 경우에는  $K$ 를 0.3으로 했을 때 이며 전동기의 토오크가 거의 0인 점까지 낮아지고 있으며 토오크의 진동이 크게 나타나고 있다.

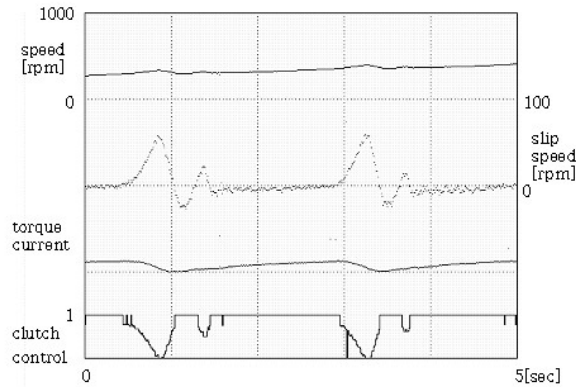


그림 4.  $K=0.3$  일 때의 실험

본 연구에서는 공전속도의 크기를 낮추기 위하여 제안한 공전제한루프를 첨가한다.

그림 5 및 그림 6은 그림 4의 조건에서 공전속도를 제한한 경우이며 제한이득이 각각 0.02, 0.03인 경우의 응답이다. 적은 량의 제한으로 공전속도의 크기가 감소하고 토오크의 감소가 현저하게 개선되었음을 볼 수 있다. 실험결과로는 그림 5의 경우가 가장 좋은 응답을 보이고 있으며 가속력도 가장 큰 것으로 나타내고 있다.

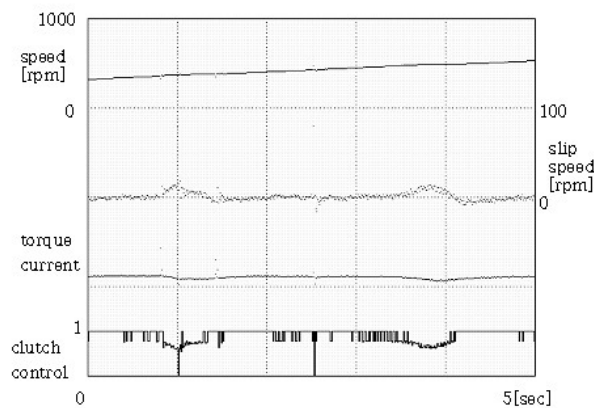


그림 5.  $K_s=0.02$  일 때의 실험

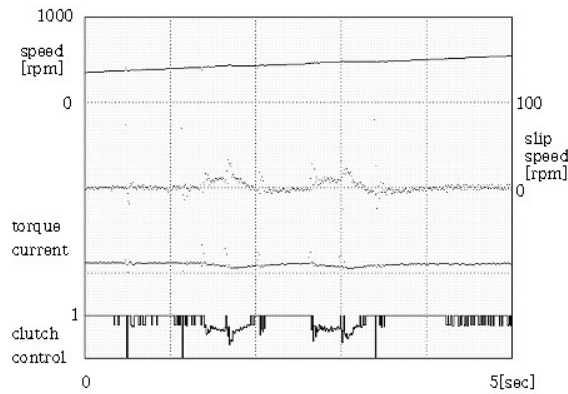


그림 6.  $K_s=0.03$  일 때의 실험

공전속도를 제한한 점착제어는 개선된 특성을 보이고 있으나 제한이득은 실험을 통한 조절이 필요함을 고찰할 수 있었다. 또 전자클러치의 동특성은 언급되지 않았으므로 실제차량의 조건과 얼마나 접근하는가 하는 것이 중요한 요소라 할 수 있다.

## 7. 결 론

본 연구에서는 동기영역에 있어서 연산된 전압벡터가 인버터의 출력전압과 항상 위상이 일치하도록 위상보정이 행해지는 PWM변조방법을 사용하였다. 전력반도체소자가 180도 구간을 연속하여 통전하는 과변조영역에서는 벡터제어의 요소가 주파수와 위상뿐이므로 이때를 고려하여 PWM방법을 극좌표에 의한 변조방법을 채택하였다.

벡터제어의 적용에 있어서 데드타임에 의한 영향을 보상하기 위해서 제어기의 불안정성을 수반하지 않도록 별도의 보상없이 전류제한루프에 의한 보상을 하였다. 전류의 진동을 억제하기 위한 전류제한루프는 저속영역에서의 데드타임에 의한 영향을 안정하게 보상하였으며 제안된 제어방법은 견인시스템에 대한 벡터제어의 적용이 가능한 제어방법임을 실험을 통하여 확인하였다.

점착시스템은 전동기-등가차륜-클러치-관성체로 이루어지는 차륜과 레일의 등가장치를 제작하고 실험하였다. 공전을 감지하고 이 공전량을 1차 지연필터를 사용하여 토오크를 감소시키는 일반적인 방법에 공전속도를 직접제어하는 제어루프를 병행하여 제어하였다. 토오크를 공전속도에 비례하여 제어하는 요소는 공전속도의 크기를 감소시키고 점착력을 향상시켜 가속을 크게함이 실험을 통하여 확인되었다.

점착특성을 향상시키기 위하여 사용되는 재점착제어의 기술은 차량의 성능을 높이는 매우 중요한 기술이다. 이에 대하여 앞으로 실제차량의 견인시스템에 대한 직접적인 시도가 절실하며 더욱 실제적인 점착특성을 향상시키고 개선하는 방향으로 연구가 지속되어야 한다.

## 참 고 문 헌

- [1] M. Koyama, et. al., "Microprocessor - based Vector Control System for Induction Motor Drives with Rotor Time Constant Identification Function.", IEEE Trans. Ind. Appl., Vol. IA-22, No.3, pp.453-459, 1986.
- [2] H. Sugimoto, et. al., "Secondary Resistance Identification of an Induction Motor Applied Model Reference Adaptive System and Its Characteristics.", IEEE Trans. Ind. Appl., Vol. IA-23, No.2, pp.296-303, 1987.
- [3] H. Sugimoto, et. al., "A High Performance Induction Motor Drive System.", IECON'84 Proc. Vol.2, pp.833-838, 1984.
- [4] B. K. Bose, "Power Electronics and AC Drives", prentice-Hall, pp.33-40, pp.48-52, pp.140-143, pp.264-276, 1986.