

전동차의 점착특성 향상에 관한 연구

김길동*, 한영재*, 박헌준*, 이사영**
한국철도기술연구원*, 명지전문대학**

A study of adhesion characteristics progress for electric car.

Gil-Dong Kim*, Young-Jae Han*, Hyun-Jun Park*, Sa-Young Lee**
Korea Railroad Research Institute*, Myong Ji Junior College**

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. 서 론

전동차의 제점착특성은 열차의 성능을 평가하는데 중요한 것이다. 제점착특성은 공전속도에 비례하는 토오크의 저하를 1차 지연필터에 의하여 전동기의 토오크를 감소시킴으로써 얻어지는 것으로 알려져 있다. 제점착은 빠르고 정확한 공전의 검지와 공전에 따라 적절하게 토오크를 제어하여 점착력을 향상시키는 기술이며 다음 두 가지의 방법이 제안되고 있다.⁽¹⁾⁽²⁾

- (1) 공전을 검지한 후 제점착기능을 분리하여 제어.
- (2) creep영역에서 연속적인 속도검지와 이에 따르는 토오크를 제어.

두 가지의 방법에 대하여 지속적인 연구가 진행되고 있으며 공전이 검지되면 전동기의 토오크를 감소시킴으로써 차량에 제점착성을 부여하는 기술이다.⁽³⁾⁽⁴⁾⁽⁵⁾⁽⁶⁾

본 연구는 견인전동기와 같이 광범위한 속도제어범위를 갖는 인버터의 구동에 벡터제어를 도입하고 점착제어를 실험할 수 있는 등가의 실험장치를 개발하였으며 이에 의하여 점착제어에 관한 실험을 하였다.

전력반도체소자가 PWM변조되어 낮은 변조율부터 180도 구간을 연속통전하는 경우까지 응용되므로 극좌표에 의한 벡터연산을 하였다. 저속영역에서 토오크의 맥동과 전류파형에 영향을 주는 데드타임에 대한 보상은 순시전류를 제어하는 루프를 두어 완벽한 보상결과를 얻었다. 전동기의 구동실험에 있어서는 정지할 때까지 회생제동이 가능함을 확인하였으며 벡터제어가 갖는 효과적인 결과를 얻었다.

제점착제어에 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 커짐을 확인할 수 있었으며 점착특성을 향상시킬 수 있는 방법임을 실험으로 확인하였다.

2. 본 론

2.1 견인전동기의 제어방법

벡터제어는 슬립주파수형의 간접벡터방법을 적용한다. 차량에 적용하는 인버터는 180도 통전상태인 과변조에서도 사용되어야 한다. 이 때에는 전압의 위상과 주파수만을 가변할 수 있으므로 일반적으로 적용되는 전류제어 형태보다는 전압형의 적용을 하도록 한다. 전동기의 토오크에 대한 슬립주파수, 토오크전류와 자속전류를 설정하고 전동기의 공극자속을 기준으로 하여 이에 따르는 유기기전력을 추정한다. 계산된 두 축의 전압은 PWM변조를 위하여 극좌표의 벡터로 변환한다. 전류의 진동을 억제하고 파형의 보상을 위하여 전류제한 루프를 둔다.

2.1.1 견인전동기의 벡터제어

슬립주파수형 벡터제어를 구성하고, 변조율이 1보다 적은 영역에서는 자속제어기가 1로 제한되도록 하여 정자속영역의 특성을 갖도록 한다. 이때에는 설정한 토오크가 일정하면 토오크전류와 슬립이 일정하게 유지된다. 전동기의 속도가 상승되면 변조율도 상승하게 된다. 변조율이 포화하면 자속제어기가 이루어지며 제어변수의 설정기는 슬립과 토오크전류를 증가시켜 토오크를 보정하도록 동작하게 된다.

슬립과 토오크전류의 변화는 회전자와 유도전류를 변화시킨다. 이 전류는 고정자전류의 여자전류와 합해지게 되므로 자속축의 전류를 보정해 주어야 한다. 이는 회전자의 누설자속을 보상하는 역할을 한다.

인버터는 견인전동기가 타행시에는 Off상태로 있으면서 역행과 제동을 빈번하게 반복하게 된다. 이 때에 소프트 운전의 기능이 필요하며 변조율의 변화로 이 동작을 하도록 한다. 전동기의 토오크는 전압의 제곱에 비례하므로 운전중의 전동기의 단자전압을 낮추면 토오크와 전류가 낮아지게 된다. 이 원리로 변조율의 변화로 소프트 운전의 기능을 추가한다.

2.2 점착제어

차륜과 레일은 차륜자체의 판성을 갖고 있으며 레일과 미끄러지는 운동을 하는 시스템이다. 실험장치는 견인전동기(200kW) 1대에 대하여 150분의 1로 축소된 등가의 장치로 설계되었다.

2.2.1 등가실험장치

견인전동기는 산업용의 유도전동기를 사용하였다. 전자클러치의 사용가능한 상대속도가 500[rpm] 이내이기 때문에 차륜관성과 클러치사이엔 10:1의 감속비를 갖는 감속기어를 사용하였다. 차륜과 레일은 차륜 자체의 판성을 가지고 있으며 레일과 미끄러지는 운동을 하는 시스템이다. 실제와 등가인 실험장치는 차량관성체와 전동기축과의 사이에 차륜관성이 있고 미끄러짐을 갖는 장치가 되어야 한다.

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·s²/rad]이 된다⁷⁾. 실험장치의 경우 감속기어비와 축소율을 고려하여 차량에 해당하는 등가 관성체는 70[Nm·s²/rad]의 관성을 갖도록 하였다. 차륜관성은 차량의 관성과 30 : 1의 비율로 정하였다.

2.2.2 점착시스템

공전발생시의 점착계수에 대하여 다음과 같은 가정을 사용한다.

- 점착계수는 공전발생이 가장 높다. (μ_v)
- 점착계수는 공전의 발생과 동시에 어느정도 저하한다. ($\Delta\mu$)
- 점착계수는 공전속도에 대하여 비례하여 감소한다. ($-\rho \cdot v_s$)

이들 결과를 근거로 식(1)과 같은 간단한 근사 모델을 적용한다.

$$\mu_s = \mu_v - \Delta\mu - \rho \cdot v_s \quad (\text{식 } 1)$$

공전속도와 전동기의 토오르크에 대한 운동방정식은 식(2)와 식(3)으로 표현된다.

$$J \frac{d^2\theta}{dt^2} = T - r g \mu_s W \quad (\text{식 } 2)$$

$$\frac{d\theta}{dt} = \frac{v_t + v_s}{r} \quad (\text{식 } 3)$$

여기에서,

v_t : 열차속도[m/s], W : 축 중량(kg),

J : 차륜축 환산의 합성 관성모멘트[Nm·s²/rad],

$d\theta/dt$: 차륜의 축 각속도(rad/s),

T : 차륜의 원주 토오르크[Nm],

g : 중력가속도[m/s²], v_s : 공전속도[m/s],

r : 차륜반경[m], T_0 : 공전직전의 토오르크이다.

식(1)과 식(2) 및 식(3)의 관계에서

$$\frac{dv_s}{dt} = \frac{r}{J} T - \frac{r^2 g \mu_v W}{J} + \frac{r^2 g \Delta\mu W}{J} + \frac{r^2 g \rho v_s W}{J} \quad (\text{식 } 4)$$

가 되며 식(5-4)의 우변 제2항에 공전직전의 토오르크 $T_0 = r g \mu_v W$ 와 우변 제4항에 기계적 시정수

$\tau_m = (J / r^2 g \rho W)$ 을 도입하여 이 식을 정리하면

$$\frac{dv_s}{dt} = \frac{1}{\tau_m} v_s + \frac{\Delta\mu}{\rho \tau_m} + \frac{r}{J} (T - T_0) \quad (\text{식 } 5)$$

가 된다.

재점착을 위하여 공전속도를 검출하여 토오르크를 제어하는 경우 공전속도 v_s 에 비례하여 차륜의 토오르크를 감소시키는 방법으로는 재점착을 얻을 수 없다고 알려져 있다. 이 때문에 토오르크를 감소시키는 제어량을 전기적 시정수 τ_e 에 상당하는 일차지연을 도입한다. 공전속도는 검출이 가능한 것이며 주전동기의 토오르크를 공전속도 v_s 에 대하여 τ_e 의 시간지연을 갖는 토오르크의 제어량을 갖는 식(6)을 생각한다.

$$T + \tau_e \frac{dT}{dt} = T_0 - K v_s \quad (\text{식 } 6)$$

식(5)와 식(6)으로부터 다음의 방정식이 얻어진다.

$$\tau_m \tau_e \frac{d^2 v_s}{dt^2} + (\tau_m - \tau_e) \frac{dv_s}{dt} + \left(\frac{K r}{J} \tau_m - 1 \right) v_s = \frac{\Delta\mu}{\rho} \quad (\text{식 } 7)$$

식(7)에서, $\tau_m \tau_e > 0$, $\Delta\mu/\rho > 0$ 이고 식(7)의 경우에 응답특성의 변경을 위한 계환이득의 조절은 공전속도

의 계환 비례상수 K 와 공전속도 v_s 에 대한 1차지연의 시정수 τ_e 의 2가지에 의하여 가능해진다.

식(7)에 의한 공전속도의 응답은 수렴, 진동수렴, 진동, 진동발산 및 발산의 5가지의 경우가 있으며 재점착은 $t > 0$ 인 시간에 공전속도 $v_s = 0$ 인 조건으로 이루어진다. 식(7)의 해가 $v_s = 0$ 인 상태가 존재하려면 특성방정식이 수렴, 또는 발산하는 경우는 이 조건을 만족시키지 못하고 진동과 진동발산의 경우는 $t > 0$ 인 시간에 공전속도 $v_s = 0$ 이 될 수 있는 조건이 성립된다. 그러나 진동수렴의 경우에는 식(7)의 초기조건에 따라 공전속도 $v_s = 0$ 인 상태의 존재여부가 해석되어야 한다.

2.2.3 점착제어를 위한 토오르크의 제어

식(7)은 점착시스템의 조건에 따라 여러응답을 보일 수 있으나 재점착을 이루는 조건은 공전이 발생한 시점을 기준으로 공전속도가 0이 되는 조건으로 재점착을 기대할 수 있다. 본 연구에서는 식(6)의 방법에 공전속도를 제어하는 루프를 첨가한다.

$$T_1 + \tau_e \frac{dT_1}{dt} = -K v_s \quad (\text{식 } 8)$$

$$T_2 = -K v_s \quad (\text{식 } 9)$$

$$T - T_0 = T_1 + T_2 \quad (\text{식 } 10)$$

식(6)으로부터 1차지연필터에 의한 토오르크의 제어는 식(8)로 표현된다. 식(9)는 공전속도를 제어하기 위한 토오르크의 제어루프에 해당한다. 식(10)은 식(8)과 식(9)로 견인전동기의 토오르크를 공전속도에 의하여 제어하고자 하는 제안된 토오르크제어 방법을 나타낸 것이다.

제안한 제어방법으로 점착제어를 할 경우 그림 2와 같은 토오르크의 제어를 사용하게 되며 식(5), 식(8), 식(9) 및 식(10)에 의하여 식(7)의 형태로 다음의 식(11)과 같은 점착시스템의 방정식으로 변형된다.

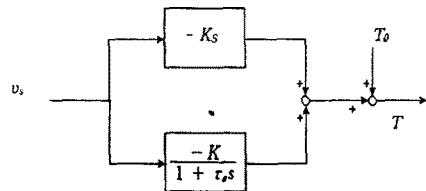


그림 1. 재점착제어 향상을 위한 토오르크 제어

$$\tau_m \tau_e \frac{d^2 v_s}{dt^2} + \left(\tau_m - \tau_e + \frac{K_s r}{J} \tau_m \tau_e \right) \frac{dv_s}{dt} + \left(\frac{(K + K_s) r}{J} \tau_m - 1 \right) v_s = \frac{\Delta\mu}{\rho} \quad (\text{식 } 11)$$

식(11)의 응답에 대하여

(a) $\frac{(K + K_s) r}{J} \tau_m - 1 > 0$: 재점착의 조건이며 계환이득이 큰 것이 전동차의 재점착성에 관여하고 있다는 것을 뜻한다. 식(7)과 비교하여 속도계환루프는 이 조건을 만족시키고 있다.

(b) $\tau_m - \tau_e + \frac{K_s r}{J} \tau_m \tau_e$: 이것은 (+), (-) 및 0 에 서도 재점착하는 조건이 있지만 기계적 시정수와 전기적 시정수의 대소관계도 재점착 성능의 중요한 요소임을 나타내고 있다. 또 (-)일 때에 비해서 (+)의 경우가 재점착 영역이 작음을 확인되고 있다.

2.3 점착제어실험

그림 2는 1차 지연필터에 의하여 실험했을 때의 응답이다. 지연필터의 시정수 τ_e 를 2(sec)로 하고 필터의 이득 K를 각각 0.1, 0.2, 0.3으로 하였다. 필터의 이득이 커질수록 슬립속도의 크기가 작아짐을 관찰할 수 있으나 토오크의 감소량이 커짐을 볼 수 있다. 효과적인 재점착제어는 공전속도의 크기도 제어방법의 성능을 평가하는 한가지 요소이나, 토오크의 감소량은 가속성능을 좌우하는 매우 중요한 요소이다. 그림 2의 경우에는 전동기의 토오크가 거의 0인 점까지 낮아지고 있다. 본 연구에서는 공전속도의 크기를 낮추기 위하여 공전회환루프를 첨가한다.

그림 3, 그림 4 및 그림 5는 그림 2의 상태에서 공전속도를 제환한 경우이며 제환이득이 각각 0.01, 0.02, 0.03인 경우의 응답이다. 적은 량의 제환으로 공전속도의 크기가 감소하고 토오크의 감소가 현저하게 개선되었음을 볼 수 있다. 실험결과로는 그림 4의 경우가 가장 좋은 응답을 보이고 있으며 가속력도 가장 큰 것으로 나타나고 있다.

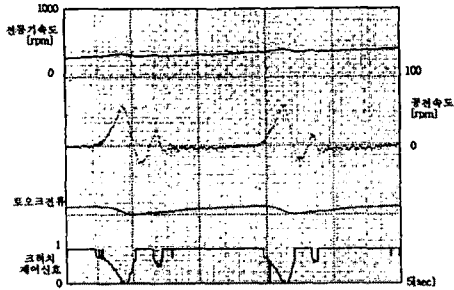


그림 2. K=0.3일 때의 실험

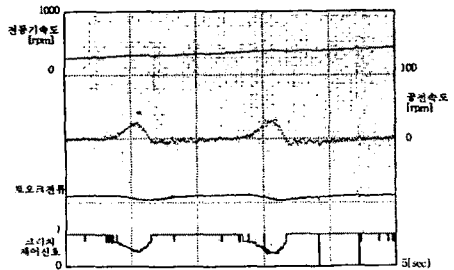


그림 3. Ks=0.01일 때의 실험

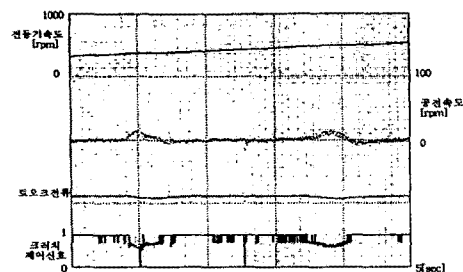


그림 4. Ks=0.02일 때의 실험

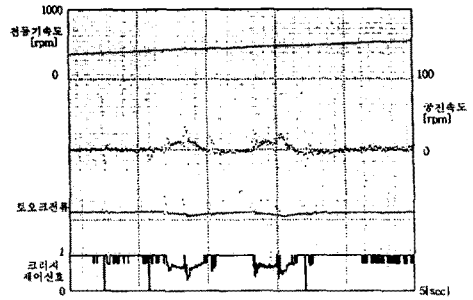


그림 5. K=0.03일 때의 실험

3. 결 론

본 연구에서는 동기영역에 있어서 연산된 전압벡터가 인버터의 출력전압과 항상 위상이 일치하도록 위상보정이 행해지는 PWM변조방법을 제안하였다. 전력반도체 소자가 180도 구간을 연속하여 통전하는 과변조영역에서는 벡터제어의 요소가 주파수와 위상뿐이므로 이 때를 고려하여 PWM방법을 극좌표에 의한 변조방법을 채택하였다.

벡터제어의 적용에 있어서 데드타임에 의한 영향을 보상하기 위해서 제어기의 불안정성을 수반하지 않도록 전류제환루프에 의하여 보상이었다. 전류의 진동을 억제하기 위한 전류제환루프는 저속영역에서의 데드타임에 의한 영향을 안정하게 보상이었으며 제안된 제어방법은 견인시스템에 대한 벡터제어의 적용이 가능한 제어방법임을 실험을 통하여 확인하였다.

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

[참 고 문 헌]

- [1] 交通・電氣鐵道技術委員會, "鐵道車輛における粘着制御技術", 日本電氣學會技術報告, 第673号, pp.3~51, 1998.
- [2] 渡邊朝紀 外 1人, "電氣車の再粘着特性の改善(トルク制御に再粘着性付加)", 日本電氣學會全國大會 pp. 8-187~8-188, 1991.
- [3] 中澤英樹 外 1人, "新方式空轉再粘着制御", 日本電氣學會全國大會, pp.8-204~8-205, 1992.
- [4] 渡邊朝紀 外 1人, "電氣車の再粘着特性に関する基礎的考察", 日本電氣學會全國大會, pp.8-206~8-207, 1992.
- [5] 渡邊朝紀 外 3人, "滑走制御の改善法", 日本電氣學會全國大會, pp.8-210~8-211, 1992.
- [6] 四方進 外 2人, "ファジィ制御を用いた滑走再粘着制御", 日本電氣學會全國大會, pp.8-212~8-213, 1992.
- [7] 한국철도기술연구원, "추진제어장치 연구개발보고서", KRRI, 1997.