

# 틸팅 차량용 추진시스템의 재점착 제어방법에 관한 연구

## A Study on Re-adhesion Control of Propulsion System for TTX(Tilting Train eXpress)

이창희\*,  
Lee, Chang-Hee

김형철\*\*\*,  
Kim, Hyung-Cheol

이은규\*\*\*  
Lee, Eun-Kyu

---

### ABSTRACT

In this paper, a re-adhesion control scheme is proposed for 1C2M propulsion system of TTX. The possibility of slip between wheel and rail in railway system is increasing because of the tendency of high speed and a climatic change. This slip results in the decrease of adhesive effort between this wheel and rail, so the control strategy of traction effort which can reduce the speed promptly and make most use of the maximum adhesive force is absolutely necessary. This paper describes the modeling of the TTX system, and this system is verified by the simulation.

---

## 1. 서 론

국내의 틸팅 시스템에 적용될 추진시스템은 유도전동기의 용량이 200KW급에서 250KW로 증대되었으며 제어장치의 출력 및 시스템 구성도가 1C4M(1-Controller 4-Moter)에서 1C2M(1-Controller 2-Motor)으로 변화되었다. 차량의 고속화를 위해서는 제어장치의 출력을 높이는 방법이 있지만 전력공급량이 증가했다하더라도 에너지 손실 및 소음·진동의 증가 문제가 초래하게 된다. 따라서 틸팅 차량 시스템의 최고 속도 향상을 위해서는 차체 및 전기장비 시스템의 경량화와 견인 전동기의 동력 발생 성능의 향상과 더불어, 차륜과 레일 간의 점착을 높게 하는 것이 중요하다. 그러나 차량이 고속으로 주행할수록 점착 특성은 낮아지고 공전이 발생하여 틸팅 차량의 견인 능력을 저감시키므로 레일과 차륜 간의 마찰계수를 최대한 이용하기 위한 공전·재점착 제어 특성의 향상이 중요하다.[1~4]

점착 성능은 점착계수에 대한 문제, 점착계수의 이용문제, 재점착 성능의 문제를 어떻게 활용하는가에 그 평가가 내려질 수 있는데 점착계수는 축에 가해지는 무게, 기후 등에 따른 조건이며 모든 차량에 관계하는 공통적인 요소라 할 수 있다. 점착계수의 이용은 점착계수의 조건과 결과를 사용하여 공전 발생시에 재빨리 점착상태로 되돌리는가의 문제와 공전과 재점착에 따르는 열차의 가속력 저하의 정도에 관한 문제이다. 결국 점착계수의 변동과 또 이를 적절하게 사용했을 때에도 재점착 성능의 문제가 실용면에서 가장 중요시되는 사항이다. 즉 공전발생에서 재점착 상태로 되돌아가는 과정이 성능을 결정하는 요인이다.

일반적인 차량에서 실용적으로 널리 이용되고 있는 정도오류·정전류 제어 방식은 공전이 발생하면 공전속도를 증가시켜 재점착을 방해하는 방향으로 작용하고 있다. 공전의 발생은 구동전동

---

\* (주)우진산전, 주임연구원, 비회원

\*\* (주)우진산전, 선임연구원, 정회원

\*\*\* (주)우진산전, 연구소장, 정회원

기의 회전속도를 상승시키고 슬립주파수를 감소시키며 전동기의 전류를 감소시킨다. 따라서 일정 전류로 제어하기 위하여 토오크가 증가하게 되고 그 결과 전동기의 회전 속도를 더욱 증가시켜 발산상태로 가게 된다.[5]

그러므로 본 논문에서는 공전을 검지하여 재점착 제어가 빠른 알고리즘을 제안하여 전동기 출력 토크에 대한 회전자의 위치 정보와 토크 전류 정보를 이용하여 점착력을 추정하고, 이 점착력을 미분하여 최대점착력이 되는 최적 공전 속도를 구한다. 이러한 제어 방법은 선로표면의 환경 변화에 따라 자동으로 최대 점착력을 추정하기 때문에 환경변화에 따른 견인력의 손실이 거의 없다. 또한 이와 같은 제어 알고리즘을 탈링 차량에 적합하도록 1C2M 시스템으로 구성하여 시뮬레이션을 수행하였다.

## 2. 본 문

### 2.1 탈링차량 추진 시스템

탈링 차량 시스템은 6량 1편성으로 일반적으로 4M2T(4 Motor Cars and 2 Trailer Cars)로 구성된다. 견인전동기에서 발생한 구동력이 바뀌어 레일간의 점착력을 발생시키고 이 점착력이 차체에 전달되어 견인력이 발생하게 된다. 따라서 점착력은 전동기에서는 부하토크에 해당되고, 차량에서는 견인력으로 취급된다.

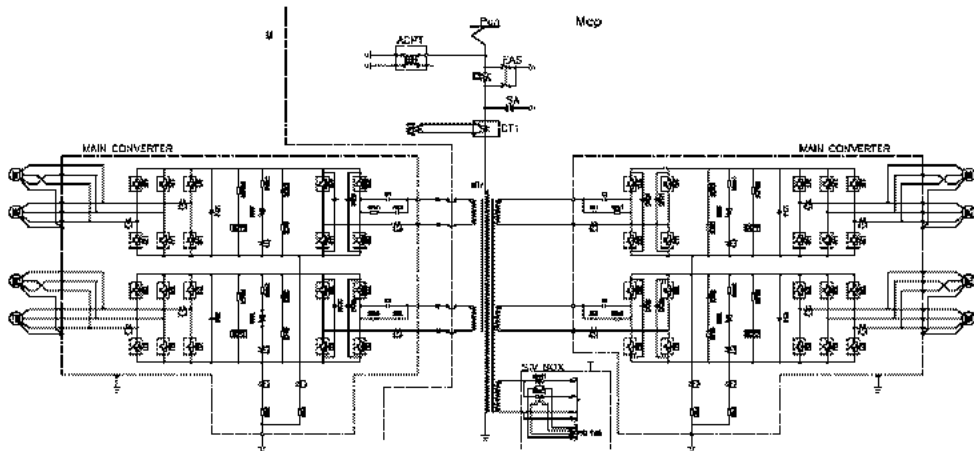


그림 1. 탈링 차량의 추진 시스템 구성도

그림 1은 탈링 차량의 추진 시스템의 구성도를 보인다. 주 변압기를 통해 4개의 추진 시스템으로 연결되어 있으며 각 추진 시스템은 컨버터와 인버터 그리고 2대의 모터를 구동하는 1C2M 시스템으로 구성되어 있다. 1C2M의 시스템은 1C4M의 구동 시스템에 비해 공전, 재점착 제어시 트럭저하가 적은 장점을 가지고 있다.

## 2.2 공전 검출

틸팅 차량의 바퀴와 레일 간은 항상 점착상태로 운전하여야 원활한 운행이 이루어지며 점착된 상태가 아닌 경우는 공전이 발생된 경우라 볼 수 있다. 일반적으로 레일표면이 건조한 경우와 젖은 경우의 공전속도에 대한 점착 계수의 관계는 그림 2와 같이 나타난다. 점착력은 바퀴와 레일 간의 재질과 접촉면의 상태 그리고 주변환경에 따라 크게 영향을 받는다. 그리고 공전속도에 따라 크립영역, 공숙영역, 최대점착력 영역으로 나누어진다. 크립 영역은 점착상태로 유지하기 때문에 안정적으로 운전된다. 그러나 공전영역은 접촉면에 점착 상태를 잃는 영역으로 전동기 회전 속도가 더욱 증가하여 불안정해진다. 최대점착력 영역은 크립영역과 공전영역의 경계점으로 이 영역을 사용하면 견인력을 최대로 이용할 수 있게 된다. 일반적으로 공전속도에 대한 점착력의 관계는 레일 표면의 상태에 따라 일정하지 않다. 또한 최대 점착력이 되는 공전속도의 크기도 다르다. 그러므로 견인력의 손실을 최소화하기 위해서는 정밀한 점착력을 얻는 것이 중요하다.

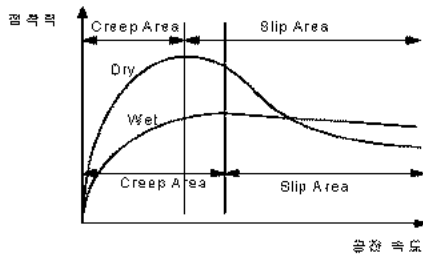


그림 2. 공전 속도와 점착력 특성곡선

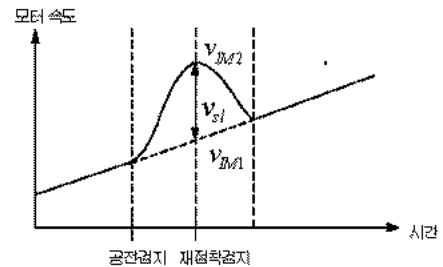


그림 3. 공전 검지 및 재점착 검지

그림 3은 공전을 검지하는 시간과 재점착을 검지하는 시간을 나타낸다. 공전은 전동기의 구동력에 의하여 가속될 때 발생하게 되는데 이 현상을 검지하여 바퀴와 레일간의 점착상태로 되돌려 놓는 제어가 재점착 제어이다. 공전을 검출하기 위해서는 주전동기의 축에 엔코더를 부착하여 속도의 정보를 감지한다. 그리고 엔코더의 각 축에 대하여 전동기의 속도 차와 속도의 시간에 대한 증가율을 검출한다.

## 2.3 재점착 제어

기존의 인버터에 의하여 구동하는 차량시스템의 점착 제어는 결과적으로 공전을 검지하여 인버터의 주파수를 제어하는 방법으로 귀결한다. 공전의 검지로 주전동기들이 구동에 적절한 설정 전류가 되도록 조절하여 주전동기의 토크를 제어한다.

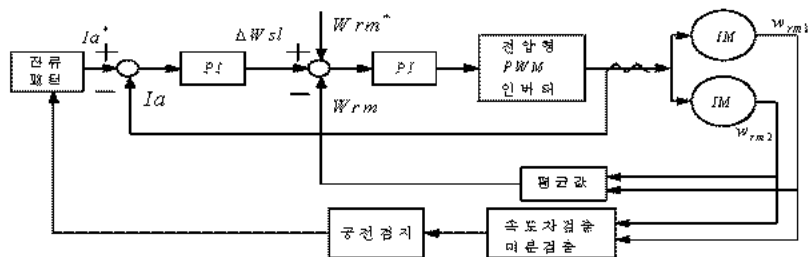


그림 4. 기존의 점착 제어 시스템

그림 4의 제어시스템은 슬립주파수를 제어하여 전동기를 재점착되게 한다. 재점착이 이루어진 후에는 주전동기의 토오크를 원상대로 회복시킨다.[5]

그러나 미리 설정한 전류 패턴에 의해 전류를 과도하게 감소시키기 때문에 점착력을 최대한 이용할 수 없으며 견인력의 손실이 많이 발생한다. 따라서 공전이 감지되면 최대점착력에서 유지되도록 전동기 토크를 제어하여야한다. 최대점착력은 공전 속도의 변화율에 대한 점착력의 변화율이 0인 식 (1)과 같다.

$$\frac{dF_A}{dv_d} = \frac{dF_A}{dt} / \frac{dv_d}{dt} = 0 \quad (1)$$

여기서  $F_A$ 는 점착력,  $v_d$ 은 공전속도를 나타내고 공전속도에 대한 시간의 미분치는 잡음에 민감하므로 점착력에 대한 시간 미분치를 0이 되는 것을 구하여 속도 지령치를 구하는 것이 유리하다.

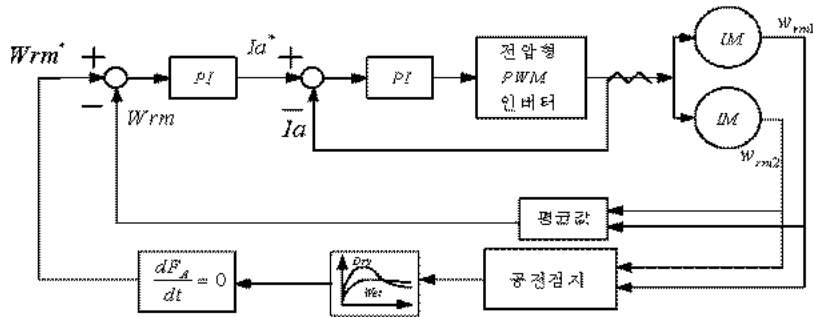


그림 5. 최대점착력을 이용한 재점착 제어

그림 5는 공전이 감지되면 그때의 점착력을 추정하고 미분관측기로 최대점착력을 유지하는 속도 지령치를 구하여 PI 제어를 통해 전류 지령치를 구한다. 전류 지령치는 q축 전류에 해당하고 이는 토크 지령치로 볼 수 있다. 따라서 공전이 감지되면 최대점착력을 가진 토크 지령치를 구할 수 있으므로 견인력의 손실을 최소화할 수 있다.

## 2.4 시뮬레이션

시뮬레이션을 하기 위하여 톨링 시스템의 유도 전동기의 사양을 표 1과 같이 하였다. 실제 적용되는 유도 전동기의 정격 출력은 250[kW]이나 추후에 축소 모형 시스템의 실험을 위해 5[HP] 유도전동기로 모델링 하였다.

표 1 전동기 파라미터

전 동 기 파 라 미 터			
출 력	5[HP]	Rr	0.37877[Ω]
정격 전압	380[V]	Ls	60.794[mH]
극수, 주파수	4극, 60[Hz]	Lr	60.794[mH]
정격회전수	1750[rpm]	Lm	59[mH]
	0.295[Ω]	Jm	0.35[kg·m <sup>2</sup> ]

1C2M 추진 시스템의 재점착 제어를 시뮬레이션을 하기 위하여 몇가지 조건을 구성한다. 첫째

로 한쪽 유도 전동기에만 공전이 발생되게 하였다. 따라서 점착력과 공전속도 사이의 특성곡선에서, 첫 번째 전동기는 날씨가 건조한 조건인 경우의 점착력을 사용하였고 두 번째 전동기는 젖은 조건인 경우의 점착력을 사용하여 점착력이 최대인 점을 맞춘다고 가정한다. 둘째로 저속 영역에서 순시 토크 제어를 수행하도록 회전자 자속을 계산에 의해 직접 얻은 후 이를 통하여 제어하는 직접 벡터제어를 사용하였다. 셋째로 공전 발생 시간은 전동기가 구동한 후 1초에서 2초 사이에 발생하게 하였다. 넷째로 속도제어기와 전류제어기는 PI 제어기를 사용하였으며 전류제어기의 응답속도가 가장 빠르게 하였고 Anti-Windup을 사용하여 적분기에 쌓인 값을 제한하여 응답을 빠르게 하였다.

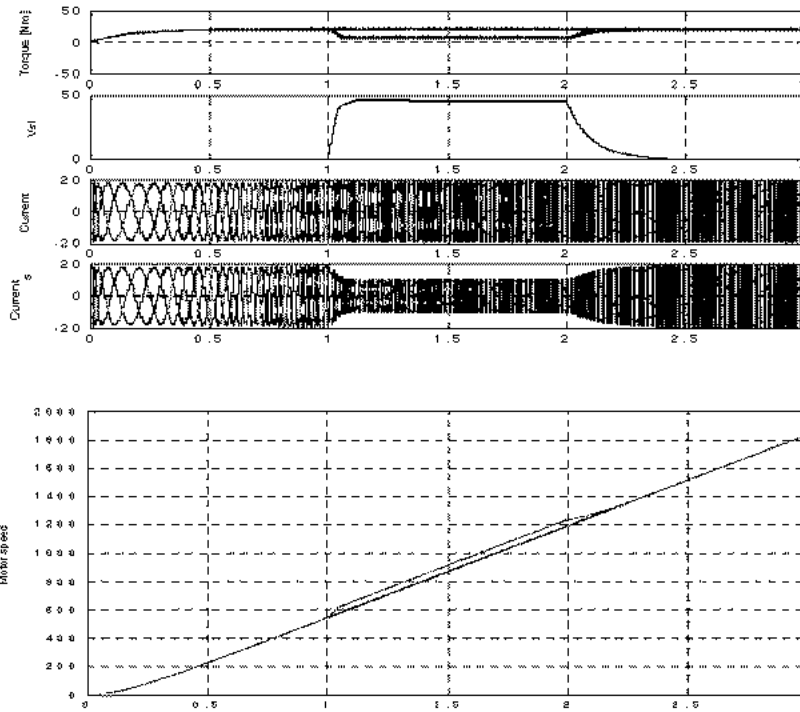


그림 6. 재점착 제어의 시뮬레이션 결과

그림 6에서 보듯이 공전이 발생하고 한쪽의 유도 전동기의 토크가 줄어드는 것을 알 수 있다. 그리고 2초에서 재점착이 이루어져 다시 원래의 토크 값으로 복귀하는 것을 알 수 있다. 이것은 공전이 발생하게 되면 공전이 감지된 전동기의 속도 제어기에 의해 전류 설정치가 줄어들게 되어 점착 상태에 있는 전동기에만 적절한 크기의 전류를 공급하게 됨으로 더 이상의 공전의 확산을 방지하고 재점착을 이루게 된 것이다.

### 3. 결론

본 논문에서는 1C2M 추진 시스템의 전동기의 구동력을 최대점착력에서 제어하는 재점착 제어 알고리즘에 대해서 언급하였다. 기존의 미리 설정된 전류 패턴에 의한 재점착 기법은 과도한 전류 감소에 의해 견인력의 손실이 발생하므로, 바퀴와 레일 간의 상태 변화 및 차량속도의 증가에 따른 공전속도에 대한 점착력의 관계를 조사하여 최대점착력에서 재점착 제어가 되는 알고리즘을

구현하였다.

향후 과제로는 재점착 제어 실험을 위해 축소모형으로 설계된 추진 시스템에 의해 실제 점착력을 검증하는 것과 실제 시스템에 적용하기 위해 안정도 및 실용화 방안에 대한 연구가 필요하다.

## 참고 문헌

1. 김길동, 이호용, 안배기, 홍계성, 한석윤, "철도차량장치의 점착력 추정에 의한 Anti-Slip 제어", 한국철도학회논문집 제6권 제4호, 2003년, pp.257-264
2. 김우석, 김용성, 강준구, 설승기, "최대점착력 추정을 이용한 철도차량의 재점착 제어 성능 개선", Trans. KIEE, Vol. 49B, NO. 1, JAN. 2000년, pp.32-39
3. Yoshiki Ishikawa, Atsuo Kawamura, "Maximum Adhesive Force Control in Super High-Speed Train", PCC-Nagaoka97, pp.951-954, 1997
4. Kiyoshi Ohishi, Ken Nakano, Ichiro Miyashita, 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
5. 서광덕, "점착력 추정에 의한 교능률 재점착제어", 서울대학교 대학원 공학박사학위논문, 1994