

# 벡터제어 전동차의 재접착 성능개선에 관한 연구

## Re-adhesion control performance improvement for a vector controlled electric motor coach

변유섭\*, 이병송\*\*, 한경희\*\*\*, 배창한\*\*\*\*

Yeun-Sub Byun, Byung-Song Lee, Kyung-Hee Han, Chang-Han Bae,

### Abstract

In electric motor coaches, when the adhesion force coefficient between rail and driving wheel decreases suddenly, the electric motor coach has slip phenomena. The characteristics of adhesion force coefficient is strongly affected by the conditions between rails and driving wheels, such as moisture, dust, and oil on the rails and so on. This paper proposes the vector control structure for the improved re-adhesion control with paralleled control of induction motors under the sudden variation of the adhesion force coefficient.

### 1. 서 론

전기철도 차량에서 차량 바퀴와 철도사이의 접촉계수의 갑작스런 감소가 일어날 때, 차량에 슬립현상이 발생한다. 차량 바퀴와 철도사이의 접촉계수 특성은 철도상의 습도나, 먼지, 기름 등에 크게 영향을 받는다. 차량운행 중 발생하는 접촉계수의 변동 하에서 보다 안정한 재접착 제어기법이 요구된다. 본 논문에서는 벡터제어로 구동되는 1C2M(1control 2motor) 구동 조건에서의 재접착 성능을 개선하고자 연구를 진행하였다. 철도차량에서 많은 경우1C4M 일반제어 구조를 갖는데 구조를 단순화하고 시뮬레이션 수행 시간을 단축하기 위해 우선 1C2M의 제어 구조에서의 재접착 제어에 관한 연구를 수행하였다. 철도차량의 토크제어 구조 내에 크게 벡터제어와 재접착제어로 분리할 수 있다. 벡터제어는 유도전동기의 선형토크 제어를 위해 사용되고 재접착제어는 휠과 레일과의 과도한 슬립을 제어하기 위해 사용된다. 일반 구동벡터제어의 문제점은 각 모터간의 여러 조건에 의해 발생하는 속도 차로 인해 각 모터가 다른 회전자 자속각을 갖게 되는데 것이다. 이 경우 어떤 모터의 회전자 자속각을 선정해야 일반제어에 유리할 것인가? 이 선택은 재접착 제어의 문제와도 연결되어 전동차의 제어성능을 결정짓게 된다. 본 논문에서는 슬립 발생시 어떤 전동기의 회전자 자속각을 벡터제어에 사용해야 재접착 제어성능을 개선할 수 있을 것인가에 관해 다룬다.

\* 한국철도기술연구원 선임연구원

\*\* 한국철도기술연구원 책임연구원

\*\*\* 한국철도기술연구원 역연과정

\*\*\*\* 한국철도기술연구원 선임연구원

## 2. 본 문

### 2.1 간접벡터제어에 의한 유도전동기 병렬구동

철도차량에서는 1C4M(1 Controller 4 Motors) 한 대의 인버터로 4대의 전동기를 제어하는 시스템을 구성하고있다. 본 논문에서는 구조를 단순화하고 시뮬레이션 시간을 단축하기 위해 1C2M으로 구성하였다. 이러한 일괄제어 방식은 경제성 위하여 사용하지만 제어성능은 1C1M처럼 높일 수 없는 단점이 있다.

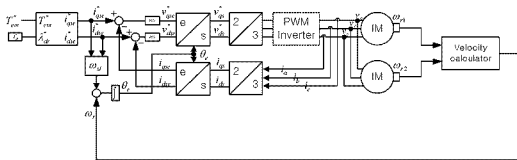


그림 1. 간접벡터제어에 의한 병렬모터구동

#### 2.1.1 간접벡터제어의 회전자 자속각 $\theta_e$ 추정

슬립속도는 간략히 식(1)로 주어진다.

$$\omega_{sl} = \left( \frac{R_r}{L_r} \right) \frac{i_{\phi se}^*}{i_{dse}^*} \quad (1)$$

병렬 구동시 회전자 각속도의 계산

$$\omega_e = \omega_{s1} + \omega_r \quad (2)$$

$$\omega_r = (\omega_{r1} + \omega_{r2})/2$$

최종적으로 회전자 자속각을 식(3)과 같이 구한다.

$$\theta_e = \int \omega_e dt \quad (3)$$

#### 2.1.2 자속관계식의 자속전류 지령 ( $i_{\phi se}^*$ )

비감성 세어시 조건으로 정리한 자속전류는 식(4)와 같이 주어진다.

$$i_{\phi se}^* = \phi_{dve}^* / L_m \quad (4)$$

성격자자속은

$$\phi_{dve}^* = \phi_{rate}^* = \sqrt{\frac{2}{3}} \frac{V_{rate}}{2\pi f_{rate}} \quad (5)$$

#### 2.1.3 토크 관계식에서 토크전류 지령 ( $i_{\phi se}^*$ )

$$T_{em} = \frac{3}{2} \frac{P}{2} \frac{L_m}{L_r} \phi_{dve} i_{\phi se}^* \quad (6)$$

$$i_{\phi se}^* = T_{em}^* \frac{4L_r}{3FL_m \phi_{dve}} \quad (7)$$

## 2.2 계점착제어

### 2.2.1 차량의 운동 방정식

유도전동기에서 발생한 각각의 구동력은 변속기어와 축을 통해 바퀴에 전달되고, 바퀴에 전달된 구동력은 바퀴와 레일사이의 점착계수와 바퀴에 수직으로 가해지는 차체의 무게의 곱에 비례하는 점착력에 의하여 차체에 견인력으로 작용한다. 견인력 전달구조에서 차체와 견인력 발생부분은 바퀴와 레일의 점착력 특성에 의해서 분리할 수 있다. 즉 두 부분의 연결 요소인 점착력을 견인력의 부하력 및 차체의 입력력으로 취급함으로써 전동기 토크 방정식은 차체의 운동방정식에 무관하게 해석할 수 있다. 그림은 차량시스템 모델링 블록도 이다.

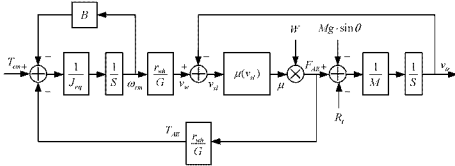


그림 2. 차량시스템 모델링 블록도

바퀴의 점착력 및 토크 운동 방정식은 다음과 같다.

$$M \frac{dv_{ix}}{dt} = F_{TE} - R_f(v_{ix}) - Mg \cdot \sin \theta \quad (8)$$

전동기의 토크방정식은 다음과 같다.

$$T_{em} = J_{oi} \frac{d\omega_m}{dt} + F_{AM} \cdot \frac{r_{nh}}{G} + B \omega_m \quad (9)$$

여기서,  $M$  : 전동기 한 개가 감당하는 차량 질량 [kg],  $g$  : 중력가속도 [kg·m/sec<sup>2</sup>]

$F_{TE}$  : 차체에 전달된 견인력 [N]

$F_{AE}$  : 바퀴와 레일 사이의 점착력 [N], ( $F_{AE} = F_{TE}$ )

$v_{ix}$  : 차량속도 [m/sec],  $R_f$  : 공기저항 등에 의한 주행 저항력 [N]

$\theta$  : 레일의 경사도,  $T_M$  : 전동기 토크 [N·m],

$\omega_m$  : 전동기 기계적인 회전각속도 [rad/sec],

$J_{oi}$  : 축으로 환산한 등가관성 [kg·m<sup>2</sup>],  $B$  : 회전 마찰계수 [kg·m/sec]

$r_{nh}$  : 바퀴의 반경 [m],  $G$  : 변속기어비이다.

변속기어로 통해 전동기로부터 바퀴에 전달되는 토크는  $T_{nh} = T_{em} \cdot G$  이고, 바퀴의 회전속도는  $\omega_{wh} = \omega_m / G$  이다.

바퀴와 레일 사이의 점착력은 점착계수와 무게의 곱에 비례한다.

$$F_{AE} \cong \mu \cdot Mg, \quad \text{여기서, } \mu : \text{점착계수}$$

주행 저항력은 차량속도와 밀접한 관련을 갖게 되는데, 일반적으로 다음과 같은 관계가 있다.

$$R_f(v_{ix}) = 1.867 + 0.0359 \cdot v_{ix} + 0.000745 \cdot v_{ix}^2 \quad (10)$$

여기서 차량속도는 [km/h] 단위를 취한다.

## 2.2.2 공전검지 및 패턴 (Pattern)에 의한 재점착제어

바퀴와 레일 사이의 마찰력이 견인전동기의 구동력보다 작아진 경우, 바퀴는 레일 위에서 미끄러져 공전한다. 이렇게 발생된 불안정한 공전은 기계적 손상, 소음 및 차량의 진동에 의한 승차감을 악화시키며 제동시 정지거리를 증가시킨다. 더욱 중요한 점은 점착력의 저하에 의해 견인능력이 감소된다는 것이다. 따라서 공전이 발생하였을 경우 그 공전을 제거하여 최적으로 정착되도록 제어하는 것이 필요하다. 이를 재점착제어라고 한다.

### 2.2.2.1 공전검지 재점착검지

본 논문에서는 단순한 공전검지 방법으로 슬립속도가 일정치 이상 발생하면 공전이 발생한 것으로 판단하고 슬립이 일정치 이하로 줄어들면 재점착 된 것으로 판단하였다. 이 방법은 매우 안정적이지만 검지 지연으로 인하여 완전한 재점착검지 까지 많은 시간이 필요하여 지연된 구동력 회복세에 따른 견인력 손실이 많은 것으로 알려 지었다. 또한 재점착검지 후의 구동력 회복 시에도 마찰력의 상태와 관계없이 구동력을 회복시키므로 마찰력이 감소상태를 유지한 경우에는 항상 재공전이 발생한다.

### 2.2.2.2 재점착력 발생 패턴

재점착력 발생 패턴에는 지수 함수적으로 발생하는 방식은 사용하였다. 이는 공전발생시 급격한 기율기로 구동력을 감소시켜 신속히 재점착을 이루고, 일정 크기부터는 완만한 기율기로 감소시켜 견인력의 손실을 줄인다. 또한 회복세에서 급격한 기율기로 구동력 회복을 빠르게 하고, 점착 기율기를 완만히 함으로써 마찰력 감소상태가 유지되더라도 재공전의 크기를 줄일 수 있다. 그러나 마찰력의 감소가 큰 경우에는 구동력의 급격한 회복에 의해 대공전이 발생할 수 있다.

## 3. 간접백터제어의 방위제어구조에 따른 재점착 성능비교

### 3.1 백터제어 슬립계산 방식1

전동기의 각 회전속도를 더한 평균으로 회전각 각속도를 구하는 경우

$$\omega_e = \omega_{d1} + \omega_r, \quad \omega_r = (\omega_{r1} + \omega_{r2})/2 \quad (10)$$

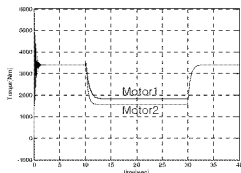


그림 3. 전동기 토크

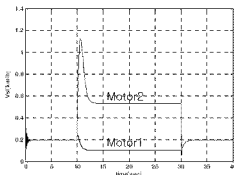


그림 4. 전동기 슬립

### 3.2 백터제어 슬립계산 방식2

전동기의 각 회전속도 중 속도가 느린 전동기의 속도를 이용하여 회전각 각속도를 구하는 경우

$$\omega_e = \omega_{d1} + \omega_r, \quad \omega_r = \omega_{r1} \quad (11)$$

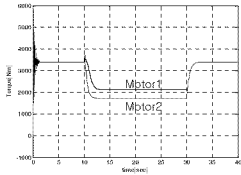


그림 5. 전동기 토크

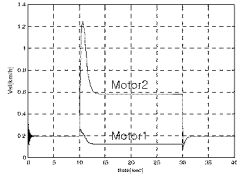


그림 6. 전동기 슬립

### 3.3 벡터제어 슬립계산 방식3

전동기의 각 회전속도 중 속도가 빠른 전동기의 속도를 이용하여 회전자 각속도를 구하는 경우

$$\omega_g = \omega_{s1} + \omega_r, \quad \omega_r = \omega_{r2}, \quad (12)$$

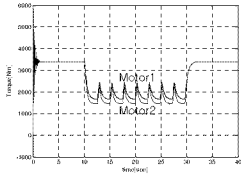


그림 7. 전동기 토크

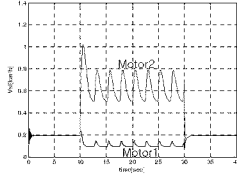


그림 8. 전동기 슬립

그림 결과에서 볼 수 있듯이 슬립이 발생했을 경우 가장 느린 전동기의 속도  $\omega_{r1}$ 을 이용하여 회전자 각속도를 구할 경우 재공전도 발생하지 않고 주어진 시간 내에서 가장 높은 속도를 낼 수 있었고 가장 빠른 전동기의 속도를 이용하여 회전자 각속도를 구하여 벡터제어를 한 경우 슬립발생시 재공전이 발생하였고 결국 주어진 시간 내에 가장 낮은 속도를 내었다.

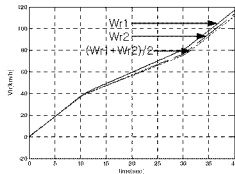


그림 9. 열차의 속도

#### 4. 시뮬레이션

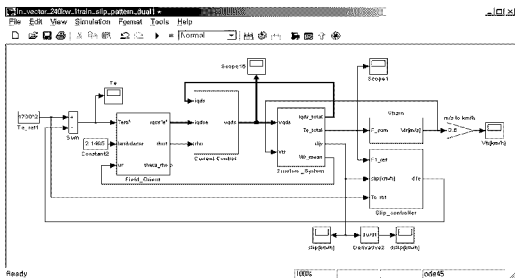


그림 10. IC2M 벡터제어 열차의 슬립제어

벡터제어 구조에 따른 재점착 성능을 비교 위해 그림과 같이 Matlab/Simulink를 이용하여 시뮬레이션을 수행하고 그 성능을 비교하였다.

표 1은 시뮬레이션에 사용된 도시철도를 유도전동기 사양과 상수이다. 시뮬레이션 조건은 동일한 경력을 갖는 두 대의 유도전동기 일정 토크 구동시 10~30sec에서 Motor2에 점착계수를 급격히 감소시킨 조건으로 수행하였다.

표 1. 유도전동기 사양 및 상수

정격출력	200[kW]	회전자저항( $R_r$ )	0.1514[Ω]
정격전압( $V_{rate}$ )	1100[V]	고정자인덕턴스( $L_s$ )	44.716[mH]
정격전류	130[A]	회전자인덕턴스( $L_r$ )	43.86[mH]
정격주파수( $f_{rate}$ )	66.5[Hz]	상호인덕턴스( $L_m$ )	42.76[mH]
정격속도	1945[rpm]	극수( $P$ )	4극
정격토크	1150[N·m]	모터관성( $J_M$ )	0.3[kg·m <sup>2</sup> ]
고정자저항( $R_s$ )	0.0855[Ω]		

#### 5. 결론

본 논문에서는 각점벡터제어에 의한 유도전동기 병렬 구동에서의 재점착제어시 벡터제어 조건에 따른 재점착 제어 영향을 시뮬레이션을 통해 보여 주었다. 병렬구동되는 전동기는 구동조건에 따른 회전속도의 편차가 발생할 수 있고 이에 따라 벡터제어에서 중요한 회전자 자속각의 위치가 각 전동기마다 달라 지게되는데 이들의 선택 방법에 따른 재점착 성능을 비교하였다. 시뮬레이션 결과에서는 전동기들 중 가장 느린속도의 전동기를 기준으로 한 벡터제어를 할 경우 재점착 성능이 가장 좋은 것으로 나타났다. 하지만 후후 고려되지 않은 여러 조건들의 고려와 연구가 필요하다.

#### 참 고 문 헌

1. Chee-Mun Ong, "Dynamic Simulation of Electric Machinery" Prentice Hall PTR, pp.433-440
2. T.Fushimi, H.Natsume and K.Matsuse : "A Method of Speed Sensorless Vector Control of Parallel Connected Dual Induction Motors",EPE'99