

한국형 고속전철의 추진성능 향상을 위한 재점착 제어기법

김문섭* · 황도하 · 김종수 · 류홍제 · 전정우 · 김용주
한국전기연구소 고속전철사업그룹

Re-adhesion Control for the Korean High-Speed Railway Train

M.S.Kim, D.H.Hwang, J.S.Kim, H.J.Ryoo, J.W.Jeon, Y.J.Kim
High-Speed Railways Group, Korea Electrotechnology Research Institute

Abstract - To improve traction effort performance and stability for the Korean High-Speed Railway Train, practical re-adhesion controller including a novel anti-slip control scheme is proposed. The presented method is verified by train running simulation results based on induction motor vector control with PWM inverter.

1. 서 론

본 논문에서는 현재 연구개발중인 한국형 고속전철을 대상으로 바퀴와 레일 사이의 점착특성에 의한 불안정한 미끄러짐을 억제하여 진동에 의한 승차감 저해, 활상에 의한 바퀴마모, 동력손실 등을 방지하고 추진성능을 개선하는 재점착 제어기의 개발내용을 서술한다. 재점착 제어는 결국 환경조건에 의해 비선형적으로 변화하는 바퀴와 레일의 점착특성에서 제어영역으로 표시된 안정적인 점착특성이 우수한 영역으로 미끄러짐의 정도를 유지하는 것이라 할 수 있다. 따라서 이러한 제어개념을 바탕으로 주어진 조건을 최대한 활용하여 한국형 고속전철을 위한 실제적 재점착 제어기를 설계하고, 향상된 제어 알고리즘의 타당성을 시뮬레이션을 통하여 검증한다.

2. 본 론

2.1 한국형 고속전철 시스템

현재 연구개발이 진행중인 한국형 고속전철은 다음과 같은 사양과 성능을 갖는다.⁽¹⁾

- 차량편성 : 2P4M16T(20량)
P+M+8T+2M+8T+M+P
- 열차중량 : 780 t
- 축 중 : 17 t
- 동 력 축 : 16개(동력대차 8대)
- 가속성능 : 평균가속도 0.99 km/h/s
기동가속도 2.322 km/h/s
- 운행속도 : 0~350 km/h
최대설계속도 385 km/h, 구배저항 5% 고려
- 바퀴직경 : 0.885 m

표 1. 견인전동기 사양

파라미터	사 양	파라미터	사 양
정격출력	1,100 kW	고정자저항	0.0428 Ω
정격전압	2,183 V	고정자인덕턴스	0.0339 H
정격전류	349 A	회전자저항	0.041 Ω
회 전 수	4,203 rpm	회전자인덕턴스	0.0338 H
시 정 수	0.8233	상호인덕턴스	0.0428 H
극 수	4	관성모멘트	0.0339 kg·m ²

2.2 재점착 제어기의 구성과 제어 알고리즘

그림 1은 한국형 고속전철의 실제 내부 시스템을 고려하여 재점착 제어기를 설계한 것이다. 먼저 기준속도, 즉 열차의 속도를 추정하고 추정된 열차속도와 바퀴 속도로부터 공전속도를 계산하여 미리 설정된 공전기준에 따라 제어기법을 다르게 적용, 기존의 제어기와 달리 각 제어기법의 장점을 살려 재점착을 위해 가장 적절한 전류 증감치를 생성하게 된다.

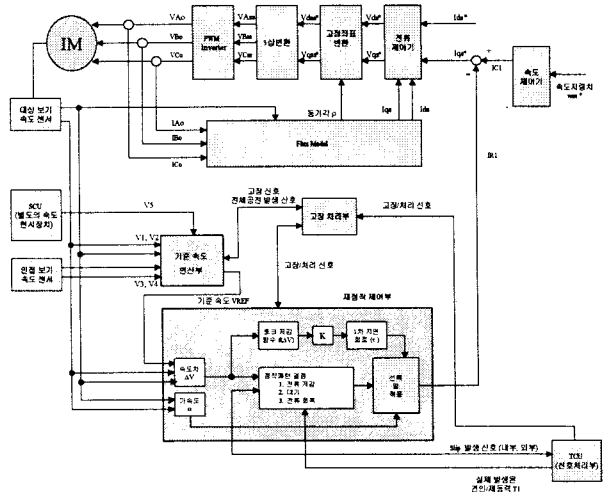


그림 1. 재점착 제어 블록도

각 블록별 구체적 기능은 다음과 같다.

2.2.1 기준속도 연산부

MBU(Motor Block Unit)내의 해당보기와 인접보기의 속도센서를 통한 속도정보 V1~V4를 얻고, 별도의 열차속도 측정장치의 속도정보 V5를 SCU(Supervisory Control Unit)를 통하여 취득, 객차축(Unloaded axle)의 정보를 추가한다. 기본적으로 V1~V4 속도정보 중 추진시 최소값, 제동시 최대값을 기준속도(유사열차속도)로 선정하고, V1~V4 속도정보가 일정 오차범위 안에서 서로 근사하다면, 가속도 기준이 허용한계 가속도를 초과하고 있는가에 따라 정상상태인지 또는 전체 공전상태인지를 판단하게 된다. 전체 공전상태로 인정되는 경우에는 재점착 제어기능을 차단하고, 고장처리부를 통하여 TCU(Traction Control Unit)로 전체공전 신호를 전송한다. 또한 V5를 통해 주기적으로 V1~V4를 검증하여 속도센서의 이상유무를 파악한다.

2.2.2 재점착 제어부

설정된 기준속도 VREF와 제어대상속도 V1, V2를 비교하여 공전속도 ΔV를 산출한다. 또한, V1과 V2를 이전 값과 비교하여 가속도를 계산하고, 그 중에서 큰

값을 α 로 선정하여 제어의 기준입력으로 설정한다. 제안하는 혼합식 제어 알고리즘은 다음과 같다.

- ① 공전속도 피드백제어⁽²⁾⁽⁸⁾⁽¹⁰⁾
 ΔV 에 전류저감 함수 $f(\Delta V)$, 고정계인 K 와 1차 지연회로(시정수 τ)를 통해 유도전동기 간접벡터 제어의 입력 전류 지령치를 가감한다.
- ② 공전검지 패턴제어⁽³⁾⁽⁸⁾⁽¹⁰⁾
 ΔV 가 미리 설정된 공전속도를 초과하면 저감, 대기, 회복의 패턴을 따라 전류 지령치를 변화시킨다.
- ③ α 가 미리 설정된 허용한계 가속도를 초과한 후, 설정시간 이상 지속되는 경우 전체공전 및 재점착 제어 실패로 판단, 제어기능을 차단하고 고장처리부로 고장신호를 전송한다.
- ④ 제안하는 혼합형 제어기법
 선택 및 적용블록에서 공전속도 및 가속도에 따라 위에 언급한 제어루트들을 적절하게 활성화하여 적용한다. 실제로 시뮬레이션에서는 피드백 제어와 패턴제어 기법을 각각 독립적으로 활성화시킨 상태에서 전류지령치 감소량을 비교한 후, 그 중 항상 큰 전류지령치 감소량을 선택하여 적용함으로써 단독으로 제어기법을 적용하는 경우에 발생하는 단점을 보완하였다.

추가적으로 TCU로부터 제공되는 발생 견인/제동력 정보를 이용하여 점착패턴 및 파라미터를 보상하는 적용 기능을 부여한다.

2.2.3 고장처리부

앞에서 언급한 기준속도 연산부와 재점착 제어부 내에서의 고장신호를 받아 해당하는 처리신호를 각 고장부분으로 재전송하며, 또한 TCU로 고장발생신호를 보내고 보다 상위의 고장처리신호를 전송받는다.

2.3 재점착 제어 시뮬레이션

실제 시스템의 모의 시험장치를 통한 재점착 제어의 구현전에, 환경에 의한 점착계수의 변화에 따른 재점착 제어특성을 고찰하고 제어 알고리즘의 타당성을 검토하며, 추진 전동기에 미치는 영향을 고려하기 위해 재점착 제어 시뮬레이션을 수행하였다. Matlab의 Simulink

와 Fuzzy Logic Toolbox를 소프트웨어로 이용하였다.

2.3.1 시뮬레이션 모델

시뮬레이션을 위한 모델은 크게 4상한 Converter, PWM Inverter, Induction Motor, 그리고 Train Load로 이루어진다. 1,100 [kW]급 견인용 유도전동기의 속도 및 토크제어를 위해 실제 시스템은 직접벡터 제어방식으로 개발되지만, 시뮬레이션을 위해 간접벡터 제어방식을 적용하였으며, 유도전동기 고정좌표 d-q 모델을 구성하고, 인버터는 전압형, GTO 소자 사용을 전제로 하여 최대 스위칭 주파수 300 Hz의 Sinusoidal PWM 방식으로 모델링하였다.^[1] 그림 2는 구현된 시뮬레이션 모델로서 모듈화된 각 블록의 기능은 표 2와 같다.

표 2. 서브시스템별 기능요약

서브시스템	주요기능
wm*	제어기입력 속도 Reference 생성
Vsq ref	속도제어, q축 전류제어, 비간섭제어, 재점착제어
Vsd ref	d축 전류제어 및 비간섭 제어
Va, Vb, Vc	2상 동기좌표계 \Rightarrow 2상 고정좌표계 \Rightarrow 3상 변환
PWM	Sinusoidal PWM 출력
Triangle Wav	삼각파 출력
3 ϕ to 2 ϕ	3상 인버터 출력 \Rightarrow 2상 변환
IM	고정좌표계 d-q 모델
Vector	슬립각속도 + 전기각속도 \Rightarrow 동기속도 추종, 고정좌표계 \Rightarrow 동기좌표계
IA, IB, IC	2상 동기좌표계 \Rightarrow 2상 고정좌표계 \Rightarrow 3상 변환
AC TO DC1	AC/DC 컨버터
Train Load	주행저항, 구배저항, 제동저항, 점착특성 퍼지모델, 공전속도 산출, 열차 다이내믹스

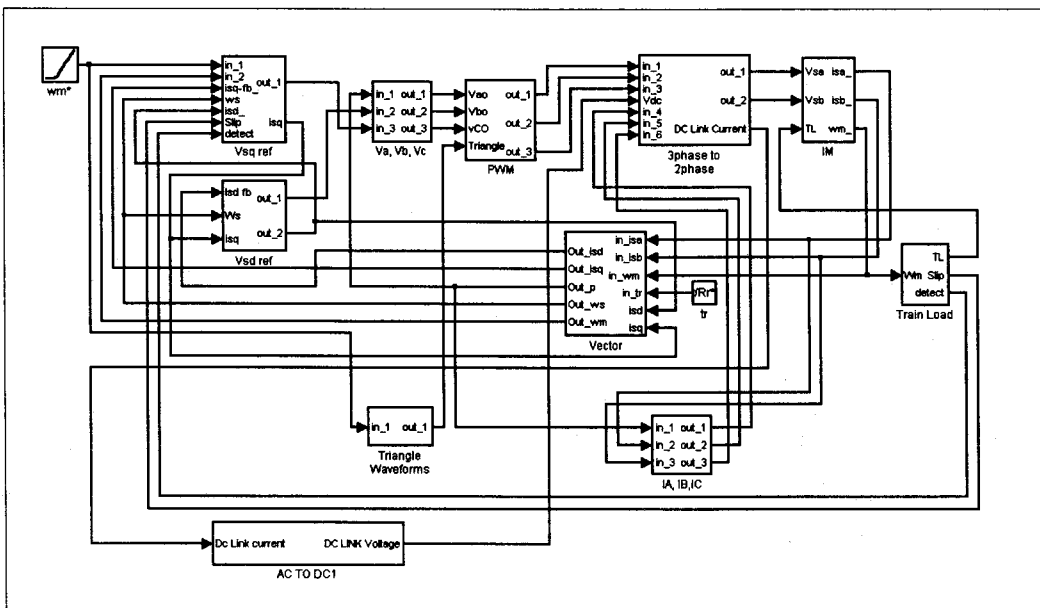
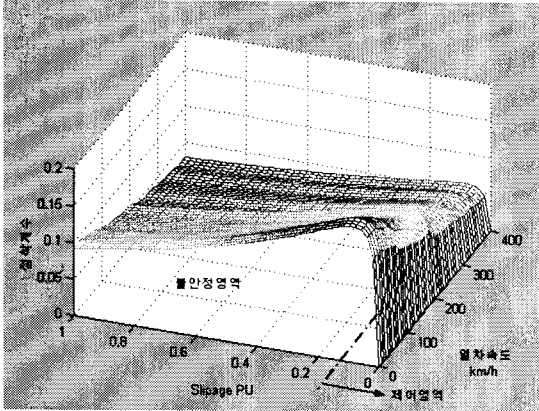


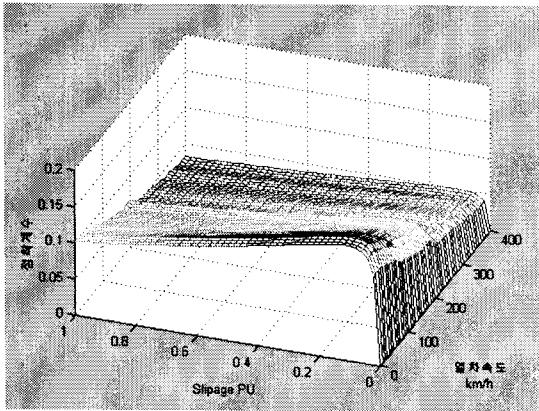
그림 2. 재점착 제어를 위한 시뮬레이션 모델

2.3.2 시뮬레이션 조건

시뮬레이션의 대상은 한국형 고속전철을 고려한 전체 열차부하와 한 대의 전동기로 제한하였다. 견인전동기의 각 파라미터는 표 1의 사양을 사용하였고, 인버터 스위칭 주파수를 고려하여 Sampling Time은 50 μ s로 설정하였다. 짐작계수는 Look-up Table이나 근사함수를 이용한 기존의 방법과 달리 General Motors의 개발 데이터를 대표값으로 이용하여 그림 3과 같은 자체 짐작모델을 퍼지논리로 구현하여 사용하였다.^[9] 추진시 속도 Reference를 50 km/h로 설정하고 0초에서 50초까지 시뮬레이션을 수행하였다.



(a) 마른 레일



(b) 젖은 레일

그림 3. 짐작특성의 변화

2.3.3 시뮬레이션 결과

마른 레일에서의 정상적인 가속상태와 가속 중에 젖은 레일의 점착특성을 부여하여 짐작계수를 감소시킨 후 발생하는 공전현상을 보이고, 각각의 제어기법을 적용하여 제어한 후에 나타나는 재점착 결과를 비교 분석한다.

그림 4는 마른 레일에서 정상적인 가속이 이루어지는 경우에 각각의 시뮬레이션 결과로 약 30초에서 속도기준 50 km/h에 도달하고, Slipage는 기동시를 제외하고 5% 내에 머물며, 최대 공전속도가 약 1.7 km/h인 것을 알 수 있다. 그림 7의 (a), (b)는 20초부터 젖은 레일의 점착특성을 적용하여 급격한 짐작계수의 감소를 모의한 결과로서 제어가 이루어지지 않은 상황에서 바퀴속도가 발산하고 있다. 그림 5는 같은 젖은 레일의 상태에서 공전검지 기준을 1 km/h로 설정하고 기존의 패턴 제어기법을 단독 적용한 결과를 나타낸 것으로서 패턴의 형태는 0.5초의 감소구간에서 전류지령치의 30%의 감소, 최대 대기시간 4초, 최대 회복시간 3초의 형태로

설정하였다. 결과적으로 바퀴속도의 발산을 억제하는 것은 가능하지만, 공전속도는 약 3.5 km/h, Slipage는 최대 8% 정도까지 발생하는 결과를 보이고 있다. 또한, 제어시 패턴 적용에 의한 상당한 크기의 리플이 발생되었다. 그림 6은 본 논문에서 제안하는 혼합식 제어기법을 적용한 결과이다. 시뮬레이션에서 사용되는 공전검지 기준은 이상적인 것으로 실제 적용을 위해서는 바퀴마모, 속도센서의 오차 등으로부터 필연적으로 발생하는 오차에 대한 여유를 감안한 기준을 적용해야 한다. 각 그림에서 나타나는 주요특징은 다음과 같다.

그림 6의 (a), (b), (c)에서 공전속도는 오히려 마른 레일의 값보다도 약간 감소된 최대 1.5 km/h까지 발생하여 공전방지에 우수한 특성을 보임으로써, 바퀴의 찰상방지에 유리하며 유지보수성의 향상이 기대된다. 또한, Slipage는 마른 레일에서의 값과 유사한 5% 내로 유지되었다. 뿐만 아니라 전 시간영역에서 소량의 속도리플만이 발생하여 재점착 제어로 인해 발생하는 진동의 감소로 승차감 향상이 예상된다.

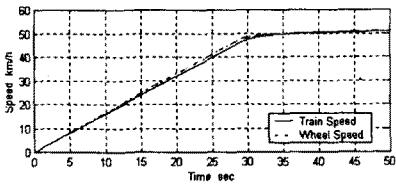
그림 6의 (d)에서 나타낸 q 축 전류제어의 전류지령치의 크기는 단독제어에 비해 재점착 제어가 이루어지는 20초 이후에도 완만한 변화가 이루어짐으로써, 전체 견인전동기 제어시스템에 안정적인 영향을 미치고 있음을 알 수 있고, 또한 상전류가 감소하여 일정하게 유지되는 정상상태 도달 소요시간은 마른 레일에서 약 35초, 단독제어에서 약 40초, 제안하는 혼합제어에서 약 45초 정도 소요되어 순수한 가속능력면에서는 단독제어에 비해 약간의 뒤짐을 보였으나, 이것은 적절한 재점착 제어에 의해 생성되는 현상이므로 타당한 결과이다.

3. 결 론

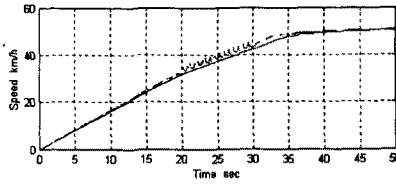
본 논문에서는 한국형 고속전철의 성능개선을 위한 재점착 제어기를 실제 시스템을 고려하여 설계하였다. 또한, 기존 제어기법의 단독사용에서 발생하는 불안정성, 리플, 재점착 성능을 개선하는 새로운 혼합방식의 제어기법을 제안하고 시뮬레이션을 통하여 제어효과를 확인하였다. 전동기 회생제동시 슬라이드에 대한 시뮬레이션이 현재 진행중이며, 한 가지 이미 개발되어 있는 축소모의시험 장치를 통해 최종 검증이 가능할 것으로 예상되며, 추가적으로 측정오차 및 바퀴마모에 따른 오차 보정문제, 자체 고장진단 후 대처방안 등 보다 실제적인 문제점에 대한 연구가 수행될 것이다.

(참 고 문 헌)

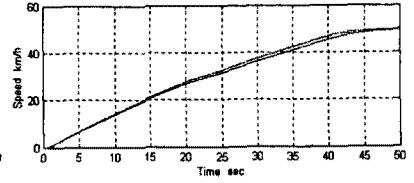
- [1] 한국전기연구원, "추진시스템 엔지니어링 기술개발 2차년도 연차보고서", 1998. 10.
- [2] Takashi Hariyama et al., "ベクトル制御を用いた新幹線電車の電動機個別制御方式車輪空轉制御", T.IEE.Japan, Vol. 118-D, No. 9, pp. 1081~1088, 1998
- [3] Akihiro Yamanaka et al., "粘着力推定を行う空轉再粘着制御-粘着力推定方法と高速新幹線電車での試験結果-", T.IEE.Japan, Vol. 119-D, No.2, pp. 243~253, 1999
- [4] T.Hata et al., "Anti-Slip Control of VVVF Inverter Driven EMUs", STECH'93, Vol. 2, pp. 255~260, 1993
- [5] Shogo Shiomi et al., "New Anti-Skid Control System Applying Fuzzy Control Technique", STECH'93, Vol. 2, pp. 218~222, 1993
- [6] R.J. Hill et al., "A Fuzzy Wheel-Rail Adhesion Model for Rail Traction", EPE'97, Vol.3, pp. 3-416~3-421, 1997



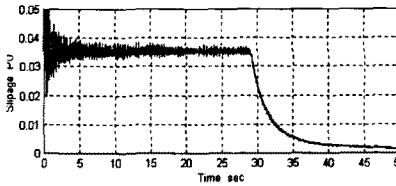
(a) 정상적인 속도변화



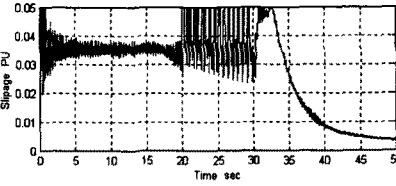
(a) 속도변화



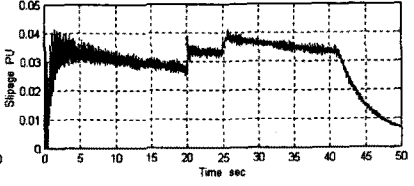
(a) 속도변화



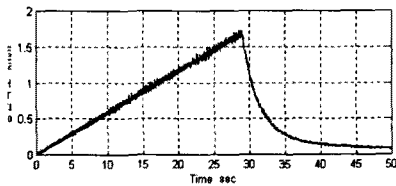
(b) Slipage 변화



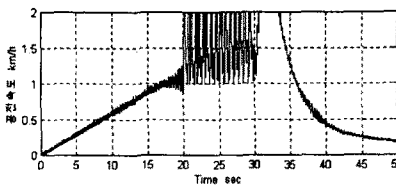
(b) Slipage 변화



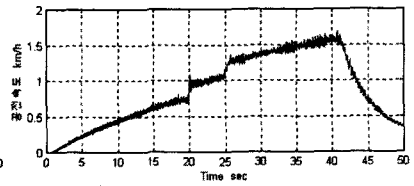
(b) Slipage 변화



(c) 공전속도 변화



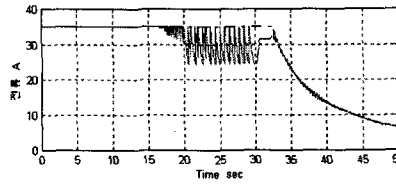
(c) 공전속도 변화



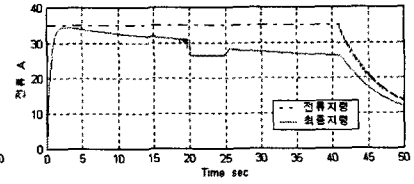
(c) 공전속도 변화

그림 4. 마른 레일에서의 모의결과

- [7] Tomoki Watanabe et al., "Adhesion Phenomena and Optimization of Readhesion Control for High Speed Trains with Wheel-Rail Adhesion Prediction", WCCR'97, Vol. D, pp.359~364
- [8] 서광덕, 설승기, "점착력 추정에 의한 고능률 재점착 제어에 관한 연구", 대한전기학회 논문지, Vol. 43, No.7, pp.1103~1111, 1994
- [9] 김문섭, 김동우 외, "휠-레일 점착 퍼지모델에 의한 고속전철의 주행 시뮬레이션에 관한 연구", 대한전기학회 추계학술대회 논문집, Vol. A, pp. 347~349, 1998.
- [10] 김문섭, 황돈하, 전정우 외, "고속전철의 Anti-Slip Control에 관한 연구", 대한전기학회 춘계 합동 학술발표회 논문집, pp. 28~30, 1999.5.



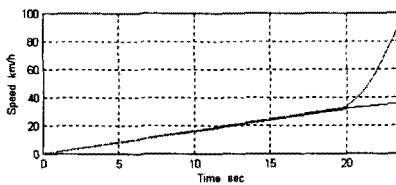
(d) 제어 전후의 전류지령치



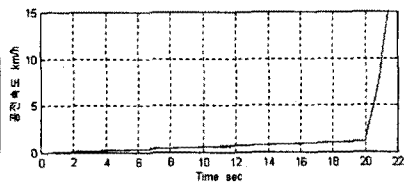
(d) 제어 전후의 전류지령치

그림 5. 젖은 레일에서 단독제어결과

그림 6. 젖은 레일에서 혼합제어결과



(a) 제어되지 않은 경우의 속도변화



(b) 제어되지 않은 경우의 공전속도변화

그림 7. 젖은 레일에서 제어하지 않은 경우

본 논문의 연구는 건설교통부, 산업자원부, 과학기술부 공동주관 아래 선도기술개발사업으로 시행되는 고속전철기술개발사업에 의해 지원을 받아 수행되었으며, 이에 관계자에게 감사드립니다.