

고속전철의 Wheel Slip Protection에 관한 연구

김문섭* · 황동하 · 김중수 · 류홍제 · 전정우 · 김용주
한국전기연구소 산업전기연구단

A Study on the Wheel Slip Protection for Korean High-Speed Railway Train

M.S.Kim* · D.H.Hwang · J.S.Kim · H.J.Ryoo · J.W.Jeon · Y.J.Kim
Industry Applications Research Center, Korea Electrotechnology Research Institute

Abstract - To improve traction effort performance and stability of Korean High-Speed Railway Train, a practical re-adhesion controller including a novel wheel slip protection control scheme is proposed. The presented method is verified by various train running simulations by induction motor vector control with PWM inverter.

1. 서 론

최근 마이크로 프로세서의 비약적인 발전으로 제어 시스템의 고성능화가 가능해짐에 따라 열차, 항공기, 자동차 등의 차량 시스템 전 분야에서 바퀴와 노면사이의 비선형적인 동특성에 의해 발생하는 바퀴 미끄러짐 현상에 관한 연구가 활발하게 이루어지고 있다.^(1,2) 특히, 시스템의 고속화를 실현하기 위해서는 Wheel Slip Protection Control이 반드시 선행되어야 할 과제로 인식되고 있다.^(3,4)

본 논문에서는 최고속도 350 [km/h]를 목표로 현재 연구개발중인 한국형 고속전철을 대상으로 바퀴와 레일사이의 비선형 점착특성에 의한 과도한 미끄러짐을 억제하여 진동에 의한 승차감 저해, 착상에 의한 바퀴마모, 동력손실 등을 방지하고 추진성능을 개선하기 위한 새로운 Wheel Slip Protection 제어기를 제안한다. 재점착 제어의 목표는 결국 환경에 의해 임의로 변화하는 바퀴의 미끄러짐 정도를 안정적이고 점착특성이 우수한 제어 영역으로 유지하는 것이라 할 수 있다. 따라서 이러한 제어개념을 바탕으로 주어진 조건을 적절하게 활용하여 한국형 고속전철을 위한 실제적 재점착 제어기를 설계하고, 제어에 의해 향상된 성능을 다양한 시뮬레이션을 통하여 검증한다.

2. 한국형 고속전철을 위한 재점착 제어시스템

그림 1은 한국형 고속전철의 실제 시스템 사안과 조건을 고려하여 설계한 재점착 제어기를 주전력변환 시스템과 함께 구성하여 나타내고 있다.⁽¹⁾ 측정된 바퀴속도로부터 열차의 속도를 추정하고, 추정된 열차속도와 바퀴속도로부터 속도차를 산출하여 미리 설정된 검지기준 (Slip Threshold)과 비교한 결과에 따라 제어가 활성화된다. 기존의 단독제어와 달리 각 제어기법의 장점을 살려 혼합형 제어로 적절한 전류 증감치를 생성하도록 하였다. 그림 2는 재점착 제어의 전체적인 알고리즘을 나타내고, 그림 3은 재점착 제어기에 대한 하부블록의 상세한 블록도를 나타내고 있다.

2.1 기준속도(열차속도) 연산부

MBU(Motor Block Unit)내의 해당대차와 인접대차의 속도센서를 통한 속도정보 V1~V4를 얻고, 경부하 축의 속도성분을 부여하기 위해 별도의 열차속도 측정 장치의 속도정보 V5를 SCU(Supervisory Control Unit)

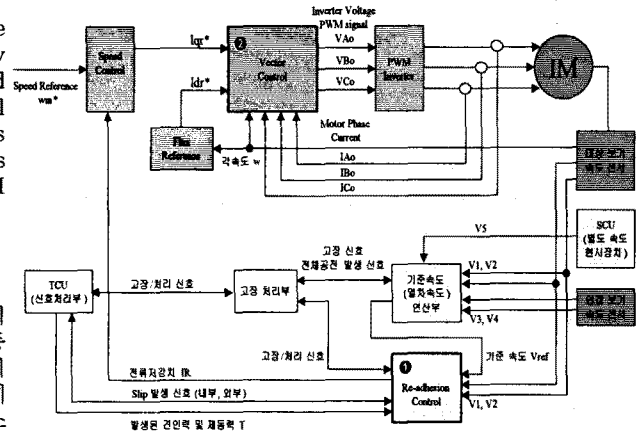


그림 1. 재점착 제어 블록도

를 통하여 추가적으로 취득한다. 기본적으로 V1~V4 속도정보 중에서 미끄러짐의 경향이 가장 적다고 예상되는 값을 열차의 속도로 가정한다. 즉, 추진시 최소값, 제동시 최대값을 유사 열차속도로 선정하여 측정된 바퀴속도와 속도차를 계산하고, 동시에 각 축의 가속도를 계산하여 제어입력으로 사용한다. 만약, V1~V4의 속도정보가 적은 오차범위 안에서 서로 근사하다면, 바퀴 가속도가 허용한계 가속도를 초과하는가에 따라 정상상태인지 또는 전체 Slip 및 Slide 상태인지를 판단한다. 전체 공전상태로 판단되는 경우에는 속도차 기준에 의한 재점착 제어기능이 차단되고, 고장처리부를 통하여 TCU(Traction Control Unit)로 전체 Slip/Slide 신호를 전송한다. 또한, V5를 통해 주기적으로 V1~V4를 검증하여 속도센서의 이상에 대비한다.⁽¹⁾

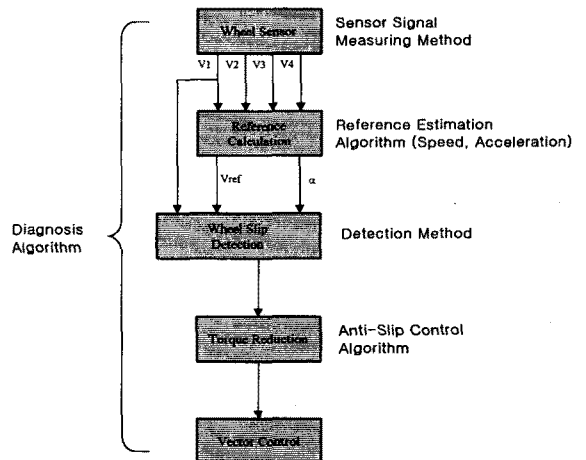


그림 2. Wheel Slip Protection Control의 흐름도

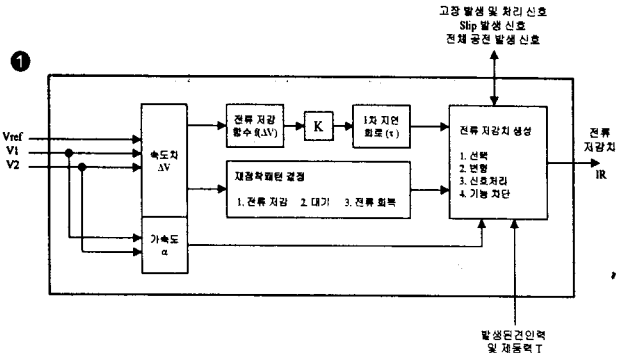


그림 3. Wheel Slip Protection 제어부

2.2 Wheel Slip Protection 제어부분

Wheel Slip Protection 제어는 선정된 기준속도 V_{ref} 와 제어대상 바퀴속도를 개별적으로 비교하여 각각의 미끄러짐을 산출하여 제어하는 개별제어가 일반적이지만, 현재 한국형 고속전철의 추진시스템이 동력대차 1대에서의 견인전동기 2대를 하나의 전력변환장치로 제어하는 1C2M(1Converter 2Motor)의 구조이므로 제어대상이 되는 두 축을 하나의 채널로 보고, 각각의 속도 $V1$ 과 $V2$ 중에서 큰 값을 선택하여 제어대상 바퀴속도 V_w 로 선정한다. 최종적으로 속도차 ΔV 는 선정된 기준속도 V_{ref} 와 제어대상 바퀴속도 V_w 의 차가 된다. 동시에 $V1$ 과 $V2$ 를 이전 주기의 증감값과 비교하여 각각의 가속도가 소프트웨어적으로 계산되고, 그 중에서 큰 값을 제어대상 바퀴가속도 α 로 선정하여 재점착 제어의 입력으로 한다. 여기서, 큰 값을 선택하는 것은 보다 미끄러짐의 경향이 큰 것을 선택함으로써 동력의 비효율적 활용이 다소 존재해도 미끄러짐의 조기 억제능력 향상에 중점을 둔 것이다.^(1,9)

Wheel Slip Protection 제어기는 입력변수들을 이용하여 결국 추진시 토오크를 제한함으로써 점착력을 회복시킨다. 제어기법은 토오크의 제한방식에 따라 크게 Slip Speed Feedback Control, Slip Detect Pattern Control, Optimal Slip Ratio Control 등으로 구분된다.⁽²⁻⁵⁾ 최근 현대 제어이론을 도입하여 고전적인 재점착 제어기법을 대체하는 연구가 이론적으로 활발하게 진행되고 있으나, 일반적인 제어대상과 달리 전기차량 시스템이 갖는 비선형성과 절대적인 안전성 확보문제 등으로 인해 개발단계에서 적용하기에는 어려움이 따른다. 또한, 재점착 제어의 특성으로 속도측정에서부터 제어기 구성까지의 과정이 제어기법 자체만큼 성능에 중요한 영향을 가져오므로 오히려 정확한 열차속도를 추정하기 위해 현대 제어이론을 도입하는 것이 더 효과적일 수 있다. 따라서 제어기의 마이크로 프로세서에 큰 부담을 주지 않으면서 동시에 이미 검증이 이루어진 전통적 제어이론을 활용하여 보다 쉽게 성능향상과 안전성을 확보할 수 있는 새로운 제어방식을 모색하게 되었다.⁽⁴⁻⁷⁾

본 연구에서 제안하는 혼합형 제어기법은 다음과 같이 기존의 제어기법을 함께 적용하여 각각의 문제점을 보완하고, 제어성능을 향상시킨다.

그림 3의 Wheel Slip Protection 제어부 입력단에서 생성된 속도차 ΔV 와 가속도 α 를 이용하여 Slip Detect Pattern 제어방식과 Slip Speed Feedback 제어방식을 모두 활성화시킨다. 1차적으로 생성된 각각의 값들은 전류저감치 생성부에서 합성되어 최종적인 전류저감치 IR을 산출한다. 저감치 IR은 견인전동기 벡터 제어부의 토오크상분(q 축) 기준전류 I_{q^*} 를 생성하는데 사용된다. 각각의 저감치 합성방법도 서로의 대소를 비교하여 그 중 저감량이 큰 값을 취하는 방법, 적은 값을 취하는 방법, 서로의 전류저감량을 상대적인 비율로 모두 적용하는 방법 등이 연구되었다. 결과적으로 단독

으로 제어기법을 적용하는 경우 발생하는 단점을 보완하고, 다양한 형태의 미끄러짐의 발생에 유연하게 대처할 수 있다. TCU로부터 제공되는 현재 추정 견인력 정보를 이용하여 저감패턴 및 파라미터를 환경에 따라 보상하는 적응기능이 추가되도록 하였다.

2.3 고장처리 부분

기준속도 연산부와 Wheel Slip Protection 제어부 내에서의 속도센서 고장, 재점착제어 실패와 같은 고장 신호들을 전송받아 해당하는 처리신호를 각 고장부위로 재전송하고, 동시에 TCU로 고장발생 신호를 전송하고, 상위 고장처리 부의 처리신호를 전송받는다.

3. 재점착 제어 시뮬레이션

한국형 고속전철 시스템의 축소형 모의 시험장치를 통한 재점착 제어의 구현에 앞서, 환경변화에 따른 재점착 제어특성을 고찰하고 제어기법의 타당성 검증과 견인 전동기에 미치는 영향을 분석하기 위하여 재점착 제어 시뮬레이션을 수행하였다. MATLAB/Simulink 및 Fuzzy Logic Toolbox를 시뮬레이션 소프트웨어로 사용하였다.

3.1 시뮬레이션 모델

시뮬레이션 모델은 크게 추진시스템, 열차부하, 점착 특성 및 미끄러짐 모의부로 구성하였다. 견인용 유도전동기의 속도 및 토오크 제어는 간접 벡터제어 방식을 적용하였고, 유도전동기 고장좌표 $d-q$ 모델을 구성하고, 인버터는 신속한 시뮬레이션을 위해 GTO 소자 사용을 전체로 하여 Sinusoidal PWM 방식으로 적용하였다.

전체 모델의 파라미터는 한국형 고속전철의 차량 기본 사양과 견인전동기 사양을 고려하여 설정하였다. 점착계수는 기존의 방법과 다르게 General Motors의 개발 자료를 대표값으로 이용하여 그림 3과 같은 점착모델을 퍼지논리로 구현하여 사용하였다.^(5,8) 추진중의 미끄러짐 특성을 중점적으로 분석하고자, 기본적으로 속도지령을 350 (km/h), Sampling Time을 50 (μs), 주행 시간은 0~50초까지 시뮬레이션하였다.

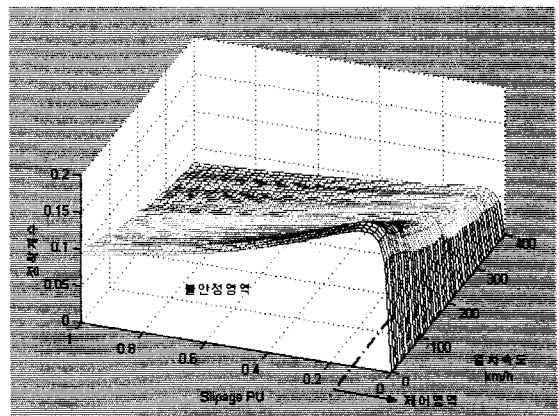
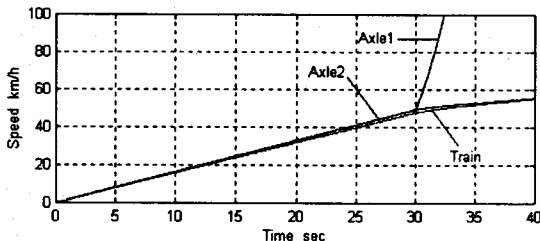


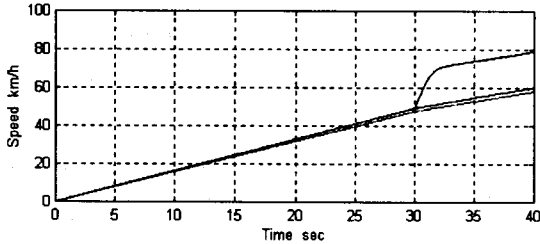
그림 4. 미끄러짐과 속도에 대한 점착특성 곡선

3.2 시뮬레이션 결과

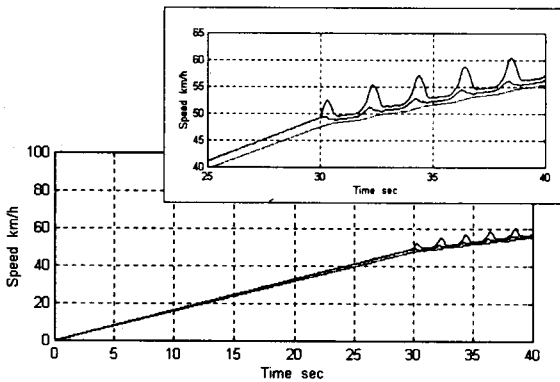
먼저 마른 레일의 정상적인 가속상태에서 젖은 레일의 상태를 부여하여 점착계수를 급격히 감소시킴으로써 임의의 미끄러짐 현상을 모의하였다. 특히, 하나의 채널로 제어되는 동력대차 1대의 두 축에 대하여 서로 다른 점착조건을 부여하고, 제어에 사용되는 속도정보를 다르게 적용하여 각각 발생하는 미끄러짐 현상을 시뮬레이션하였다. 또한, 기존의 제어기법을 단독으로 적용한 결과와 제안하는 혼합형 제어를 적용한 결과를 비교분석한다.



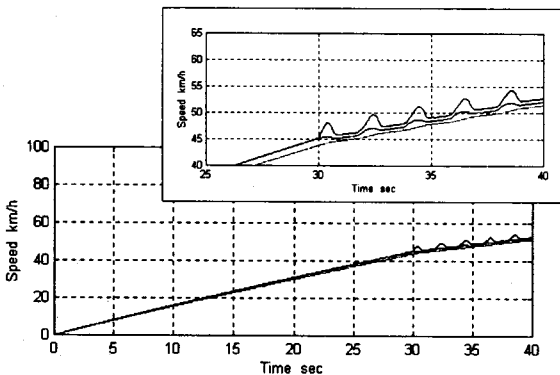
(a) 제어하지 않은 경우의 속도변화 (Select-High)



(b) 제어하지 않은 경우의 속도변화 (Select-Low)



(c) 단독 제어기법 적용시의 속도변화



(d) 혼합 제어기법 적용시의 속도변화

그림 5. 시뮬레이션 결과

그림 5의 (a)와 (b)는 마른 레일에서 정상적인 가속이 진행되다가 30초부터 젖은 레일의 상황을 적용한 결과로서 Wheel Slip Protection 제어가 수행되지 않아 과도한 미끄러짐이 발생하고 있음을 볼 수 있다. (a)의 경우는 동력대차의 두 축의 속도 중에서 큰 값을 견인전동기 제어에 이용한 결과이고, (b)는 적은 값을 이용한

결과이다. (b)의 경우, 별도의 재점착 제어가 수행되지 않았음에도 불구하고 일정 수준의 자기 점착특성을 나타내고 있다.

동일한 상황에서 기존의 제어기법을 단독으로 수행한 결과를 그림 5 (c)에 나타내었다. Slip Threshold를 약 3 [km/h]로 설정하고, 반복적인 전류지령의 감소, 대기 및 회복을 통해 결과적으로 Wheel Slip을 억제하고 있으나, 바퀴와 열차의 속도차가 최대 7 [km/h] 이상 발생하고 지속적인 리플이 발생함을 알 수 있다.

그림 5 (d)는 본 연구에서 제안하는 혼합식 제어기법을 적용한 결과를 나타내고 있다. 바퀴와 열차의 속도차가 약 4 [km/h] 이하로 유지되고 있어 단독 제어결과에 비해 우수한 제어성능을 보이고 있다. 결과적으로 미끄러짐에 의한 찰상과 재점착 제어로 인해 유발되는 진동의 감소로 승차감 향상이 예상된다. 순수한 가속능력 측면에서는 단독제어에 비해 약간의 뒤짐을 보였으나, 이것은 적절한 재점착 제어에 의해 생성되는 현상이므로 타당한 결과라 할 수 있다.

4. 결 론

본 연구에서는 한국형 고속전철 추진 시스템의 성능개선을 위한 Wheel Slip Protection 제어기를 실제 시스템을 고려하여 설계하였다. 기존 제어기법의 단독사용에 의해 발생하는 불안정성, 리플, 재점착 성능을 개선하는 새로운 혼합방식의 제어기법을 제안하고, 추진 시스템 및 열차부하를 모델링하여 수행한 시뮬레이션을 통해 제어효과를 확인하였다.

향후, 전동기 회생제동시 Slide에 대한 시뮬레이션을 추가하고, 축소 모의시험 장치를 통한 검증과 하드웨어적인 실용화가 이루어질 예정이다. 추가적으로 측정오차와 바퀴마모에 따른 오차 보정문제, 자체 고장진단 후의 대처방안 등 실제적인 차량시험에서 제기될 문제점에 대한 연구가 심도있게 수행되고 있다.

(참 고 문 헌)

- (1) 한국전기연구소, "추진시스템 엔지니어링 기술개발 2차년도 연차보고서", 1998. 10.
- (2) T. 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) A. 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) S. 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
- (7) T. Watanabe et al., "Adhesion Phenomena and Optimization of Readhesion Control for High Speed Trains with Wheel-Rail Adhesion Prediction", WCRR'97, Vol. D, pp. 359~364, 1997
- (8) V.K. Garg et al., "Dynamics of Railway Vehicle Systems", Academic Press, 1984
- (9) 전정우 외, "고속전철용 견인전동기 제어", 대한전기학회 하계학술대회 논문집(A), pp. 333~335, 1998. 7.
- (10) 김문섭 외, "한국형 고속전철의 추진성능 향상을 위한 재점착 제어기법", 대한전기학회 하계학술대회 논문집(A), pp. 461~464, 1999. 7.