

전동차의 전기제동에 있어서 구배가 있는 경우 정지 토크의 발생방법에 관한 연구

이사영*, 황락훈**, **오형석****, 김길동***, 이한민***, 이장무***, 최기수****, 엄주경****
 명지전문대*, 세명대학교**, 한국철도기술연구원***, 인텍FA****

A Study on the Generation Method of Suspension Torque as regard to Gradient in Electric Braking of Railway Vehicles

Sa-Young Lee*, Lark-Hoon Hwang**, Hyeong-Seok**, Kim Gil-Dong Kim***, Han-Min Lee***, Jang-Moo Lee***, Gi-Soo Choi****, Ju-Kyoung Eom****

Myongji College*, SeMyung University**, Korea Railroad Research Institute***, Intech-FA****

Abstract - 전기제동의 영역확대는 전동차의 성능향상을 위하여 연구가 지속되고 있으며 전기제동으로 전동차를 정차시키는 방법을 사용할 때 공기제동은 정차 후 정지를 유지하는 정차브레이크의 기능만 필요하게 된다. 정지 후 전동기의 회전을 방지하여야 하므로 구배가 있는 곳에서 전기제동으로 정차시킬 때는 정차브레이크를 사용하기 이전까지 전력변환기는 정지 토크를 발생하는 기능을 갖고 있어야 한다. 본 연구에서는 정지 토크를 발생시키기 위하여 구배로 인한 부하 토크를 추정하여 전동차를 정차시키는 방법에 관한 것이다.

1. 서 론

전동차의 성능향상을 위하여 여러 가지의 방법들이 연구되고 있다. 차량의 중량을 감소시키는 방법 등, 에너지사용의 효율향상과 유지보수 측면 및 발생소음의 저감방법[1],[2],[3]들이 제안되고 있다.

현재 국내의 전동차는 감속할 때 전기제동과 공기제동을 병행하여 사용하고 있으며 속도가 낮아지면 공기제동만으로 정차시키고 있다. 공기제동은 근본적으로 기계적 마찰을 응용한 장치이므로 소음과 분진들은 차량의 성능을 저하시키는 원인이 되고 있다.

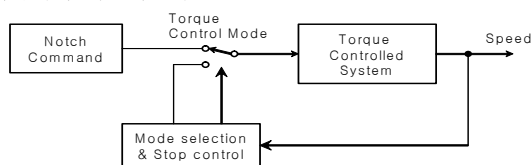
전동차에 적용되는 전기제동은 발전제동과 회생제동을 들 수 있다. 발전제동은 제동저항에서 열에너지로 변환하여 발산함으로써 제동력을 얻으며 발생된 열에너지는 지하터널의 온도상승을 유발시킨다. 회생제동은 가선으로 제동에너지를 보냄으로써 제동력을 얻으며 회생전력을 주위에서 운전하고 있는 다른 전동차에 보내고 에너지의 효율적인 사용을 기대할 수 있다. 이렇게 고속영역에서 큰 회생에너지는 가선의 전압을 상승시키는 요인을 해소하고 전기제동의 확대에 관한 방법[1],[2]의 연구들이 보고되고 있다.

전동차를 전기제동에 의하여 정차하는 방법을 사용하려면 전기제동에 따르는 회생전력이 가선전압을 상승시키지 않도록 가선이 회생전력을 흡수하는 능력이 있어야 한다. 이 조건에서 정지까지 전기제동이 가능하며 전기제동만을 사용함으로써 공기제동에 필요한 취부부품을 감소로 경량화 및 유지보수면에서도 유리해진다. 또한 공기제동을 사용할 때 발생하는 기계적 마모나 이로 인한 소음의 경감과 분진 등이 발생하지 않는 장점을 갖게 된다. 따라서 공기제동의 기회를 최소화 하는 연구는 에너지사용의 효율과 차량의 성능향상 및 환경적인 측면에 기여하게 된다. 본 연구는 전동차를 전기제동으로 정차시키는 방법에 관한 것으로 부하 토크를 추정하여 정지 토크의 기능을 부여하였다. 구배의 조건에서도 전기제동으로 정차가 가능할 것이며 축소모형 실험 장치를 통하여 실험으로 확인하였다.

2. 전기제동에 의한 정차

2.1 토크 제어

전동차는 정차를 시키기 위해서 정토크의 전기제동으로 감속하며 정지의 순간에는 제동 토크를 감소시켜야 한다. 따라서 그림 1과 같이 감속구간과 정지의 순간은 토크 제어의 방법이 다르게 되므로 제어모드를 전환하는 방법을 사용하게 된다. 또 운전 중 가속도의 변화는 승차감에 영향을 주므로 모드의 전환은 극 저속에서 이루어진다.



<그림 1> 제어모드의 전환

2.2 정지순간의 제어

전동기는 식(1)과 같이 발생 토크와 부하 토크의 차에 의하여 가속 혹은 감속을 한다.

$$\frac{d\omega}{dt} = \frac{T - T_L}{J} \quad (1)$$

그림 1에서 제어모드가 전환되었을 때 전기제동으로 정지하기 위하여 전동기의 가속도를 식(2)와 같이 속도에 비례하는 제동력을 갖도록 토크를 제어한다.

$$\frac{d\omega}{dt} = \frac{T - T_L}{J} = \frac{-k\omega}{J} \quad (2)$$

식(2)에 의한 토크의 제어는 하여 로 한다. 부하 토크의 추정이 가능하다면 토크의 설정 값은 식(3)과 같이 된다.

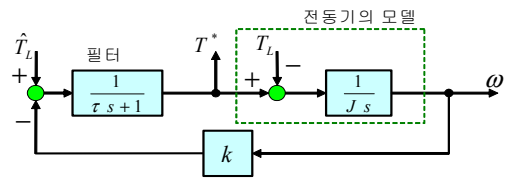
$$T^* = \hat{T}_L - k\omega \quad (3)$$

식(3)과 같이 토크를 제어하여 전동기를 정지시킬 수 있다. 식(2)와 식(3)의 관계로 토크의 설정 값과 실제의 부하 토크 및 추정된 부하 토크는 식(4)와 같이 나타낼 수 있다.

$$J \frac{d\omega}{dt} = T^* - T_L = \hat{T}_L - k\omega - T_L \quad (4)$$

극 저속에서 속도의 검출과 부하 토크의 추정에 오차와 노이즈 등을 고려하여 1차 지연필터를 사용하면 식(4)는 식(5)와 같이 되고 식(5)는 그림 2의 블록도와 같이 된다.

$$J_s \omega = (\hat{T}_L - k\omega) \left(\frac{1}{\tau s + 1} \right) - T_L \quad (5)$$

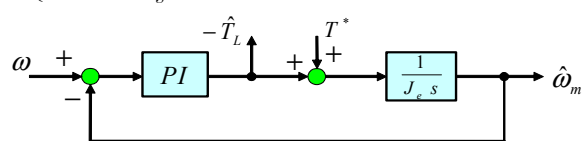


<그림 2> 정지제어

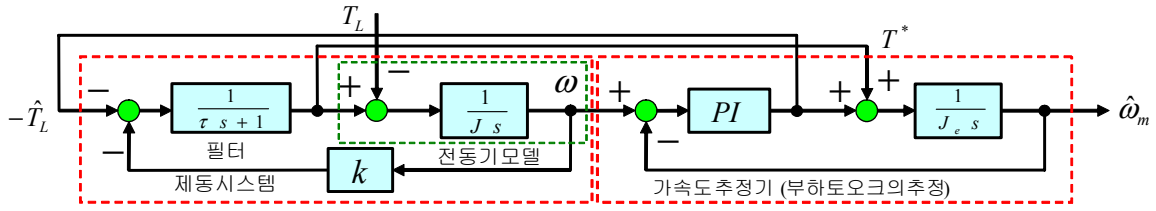
2.3 부하 토크의 추정

구배는 전동기의 부하 토크로 작용하게 되므로 부하 토크를 추정한다. 전동차는 관성이 매우크기 때문에 가속도의 변화가 매우 적으며 부하 토크는 가속도를 추정과정에서 얻어질 수 있다. 부하 토크의 추정에 있어서 계산과정의 전동기 토크 오차는 가장 큰 영향을 주게 되며 부하관성의 변화 등 관측기의 제정수의 변화도 고려할 사항이 된다. 실험 장치에서 전동기의 토크는 그림 2의 출력으로 전동기를 구동하게 된다. 속도검출기에 의하여 측정된 속도에 의하여 가속도를 추정할 때 시스템의 관성 등 제정수의 오차의 영향을 받지 않도록 식(6) 및 그림 3과 같이 PI제어기에 의하여 추정하는 방법을 사용한다.

$$\begin{cases} J_e \frac{d\hat{\omega}}{dt} = T^* - \hat{T}_L \\ -\hat{T}_L = \left(\frac{k_i}{s} + k_p \right) (\omega - \hat{\omega}) \end{cases} \quad (6)$$



<그림 3> 부하 토크의 추정



〈그림 4〉 부하 토크의 추정과 정지제어

2.4 제어모드의 전환

그림 2와 그림 3에 의하여 그림 4와 같은 부하 토크의 추정에 의한 정지제어 시스템이 완성된다. 그림 4에서 전동기의 모델은 인버터와 동기전동기로 대체되어 실험하게 된다. 정토크의 제동으로 감속되는 동안 그림 1에서 그림 4로 제어모드의 전환은 제동 토크와 식(3)의 토크와 비교하며 식(7)의 조건에서 모드를 전환한다.

$$T \geq \hat{T}_L - k\omega \quad (7)$$

그림 4에 의하여 전기제동으로 전동기를 정지시킬 때 가속도 추정기에서 PI제어기의 적분기는 속도가 0으로 수렴하도록 하는 동작을 하므로 정지 토크를 갖게 된다.

3. 실험과 측정

3.1 추정기와 정지제어기

실험에 사용된 축소 견인시스템의 제원은 다음 표 1과 같다.

〈표 1〉 축소 견인시스템

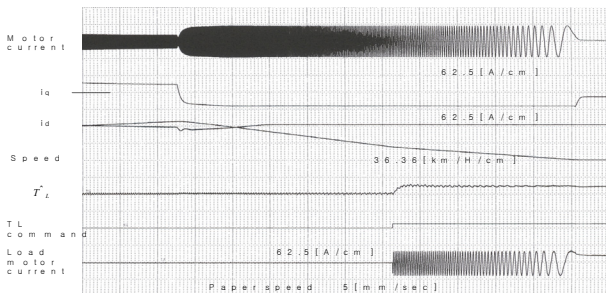
구분	종류	정격	비고
구동전동기	PMSM	5[kW]	서보전동기
관성체	직결방식	7.2[Nms ² /rad]	
부하용전동기	PMSM	5[kW]	서보전동기
속도검출기	레졸바		tamagawa
운전범위		824[rpm]	최대 1200[rpm]
인버터	병렬 FET	350[A]	전류제어형PWM
제어기	16비트 DSP	56F8345	

그림 4의 추정기는 실험 장치와 등가가 되어야 하므로 실험에 의한 방법으로 추정기와 정지제어기의 상수를 조정한다.

1. 가속도 추정기의 적분상수 : 부하용 전동기를 구동하지 않은 상태(구배가 없는 조건)에서 가 감속 실험에 의하여 적분상수를 정한다.
2. PI제어기의 게인 : 감속 중에 부하용 전동기를 구동하여 응답을 관찰하여 정한다.
3. 필터계수와 속도 게환량 : 가속도의 변화는 실제 차량에서 좋지 않은 승차감을 유발할 것이므로 극 저속에서 짧은 시간에 정지하도록 상수를 선택한다.

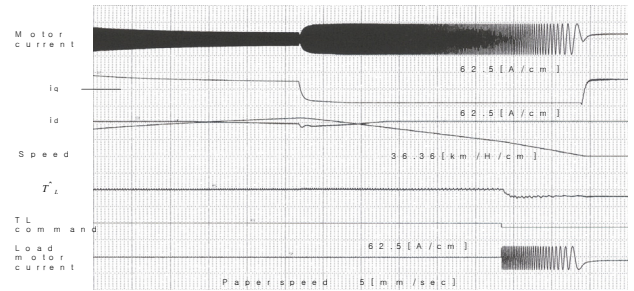
3.2 실험결과

구동전동기를 가속한 다음 일정속도에서 제안된 방법으로 제동실험을 하였다. 실험 장치는 직결구동방식의 축소모형이며 회전속도가 824[rpm]일 때 전동차의 속도는 120[km/H]에 해당한다. 그림 5와 그림 6은 80[km/H]까지 가속 후 제동상태를 측정하는 것이다. 각각 부하전동기의 토크가 (+)일 때와 (-)의 에 대하여 실험한 것이며 전동차가 구배를 오를 때와 내려갈 때에 해당된다. 그림 7은 정지의 순간을 확대하여 측정하는 것이다. 극 저속에서 정지제어가 이루어짐을 나타내었다.

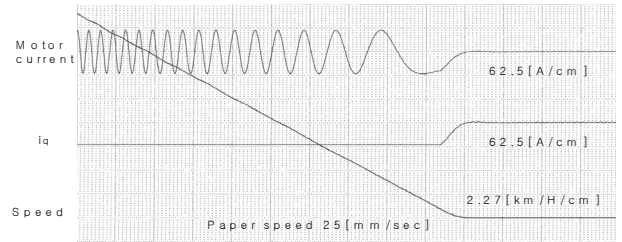


〈그림 5〉 (+)부하 토크의 추정과 정지제어

부하 토크의 추정결과는 정지하는 순간에만 사용되며 그림 5, 그림 6 및 그림 7에서 토크 성분의 전류가 감소하는 구간이 제어모드를 전환하여 정지제어를 하는 구간이 된다. 그림 5와 그림 7을 관찰하면 정지한 후에도 부하 토크를 추정하고 있으며 구배의 조건에서 정지 토크를 발생함을 알 수 있다.



〈그림 6〉 (-)부하 토크의 추정과 정지제어



〈그림 7〉 정지제어

4. 결론

현재 국내의 전동차는 공기제동과 전기제동을 병행하여 사용하고 있다. 완전한 전기제동을 하기 위해서 정지까지의 전기제동과 정지의 순간에 정지 토크를 갖도록 하였다. 따라서 정지 후 공기제동에 의한 정차브레이크를 사용하도록 한다면 공기브레이크의 사용기회를 최소화할 수 있다. 이로써 얻어지는 효과는

1. 제륜자 등 제동부품의 마모와 분진의 발생을 감소시킨다.
2. 제동순간의 소음이 저감된다.
3. 제동장치의 유지보수에 유리하다.
4. 회생제동의 확대에 에너지활용을 극대화할 수 있다.

[참고 문헌]

[1] T. Suzuki, T. Koseki, S. Sone, "A Study on a Method of Train Automatic Stopping Control with a Pure Electric Brake", I.E.E. Japan Joint Technical Meeting on Transportation & Electric Railways and Linear Drive, TER-00-37 LD-00-64, pp. 15-18, 2000.
 [2] S. Takashi, K. Takafumi, "Simple Train Automatic Stopping Control with Constant Power Braking Pattern Supposing the Pure Electric Brake." JISAC2001, Vol. 3, pp. 1285-1288, 2001.
 [3] K. Matatsuo, M. Kondo, Y. Shimizu, "Totally-Enclosed Type Traction Motor Using Permanent Magnet Synchronous Motor." IEEJ Trans. IA, Vol.124, No.2 pp 175-182, 2004.