

상전도 흡인부상시스템에서의 속도특성에 따른 강인한 제어기에 대한 연구

임 달 호, 권 병 일, 홍 정 표, 허 진, 정 인 성, 이 상 우
한양대학교 전기공학과

A study on the robust control considering speed characteristics for EMS system

Im D. H., Kwon B. I., Hong J. P., Hur J., Jung I. S., Lee S. W.
Dept. of Electrical Eng. Hanyang Univ. Seoul

Abstract

The controller for magnetically suspended vehicles considering the speed characteristics is presented.

Generally, the attraction force of magnet is determined by input current and air gap. However, when MAGLEV runs at high speed, induced eddy currents in the rail decrease the attraction force. Thus control characteristics of MAGLEV become deteriorated. Therefore, the variation of attraction force according to speed must be considered. Thus we analyzed the speed characteristics of the magnet by FEM.

Also, we study on the control characteristics according to speeds, and design the controller considering the decline of levitation force using Neural Network.

1. 서론

상전도 흡인식 자기부상시스템은 근본적으로 불안정한 시스템으로서 부상용 전자석에서 발생하는 흡인력을 이용하여 레일과 전자석 사이의 공극을 일정하게 유지하면서 주행하는 시스템이다. 이와같이 주행하는 자기부상시스템의 부상용 전자석의 부상력은 일반적으로 전자석의 사양과 레일과 전자석 사이의 공극 및 전류에 의해서 결정되며, 비선형식으로 표현된다. 하지만 실제로 속도의 증가에 의해서 레일 측에 발생하는 와전류의 영향에 의해서 공극 및 전류가 일정한 경우에도 부상력은 변하게 되며, 이에따라, 제어특성 역시 변하게 된다.

유한요소법을 이용하여 전자석의 주행속도에 따른 부상력 특성을 해석하였으며, 이를 토대로 하여 속도의 변화에 의한 부상력감소의 영향을 고려한 제어기를 설계하였다.

2. 부상용 전자석의 속도특성

그림1과 같이 자극간격 L_p , 자극길이 L , 전류밀도 J_{DC} 인 전자석을 해석모델로 하여 이와같은 전자석이 Z축방향으로 동일한 극성을 갖고 주기적으로 배치된 부상용 전자석에 대하여 식(1)의 지배방정식에 대하여 다음과 같은 가정을 두고 Galerkin 유한요소법을 이용하여 2차원 해석하였다.

- ①레일의 도전율은 일정하며, 자기포화현상은 무시한다.
- ②코일의 와전류는 무시한다.
- ③주행레일에 발생하는 와전류는 주행방향 성분만을 고려한다.
- ④여자전류와 자기벡터포텐셜은 Z성분만을 고려한다.

맥스웰방정식으로 부터 다음과 같은 지배방정식을 얻을 수 있다.[1]

$$\nabla^2 \nu \vec{A} = - [\vec{J}_C + \alpha (\vec{V} \times \vec{B}) + \sigma \nabla \phi] \quad (1)$$

\vec{V} : 주행속도, \vec{J}_C : 전자석의 여자전류
 \vec{B} : 자속밀도, ν : 자기저항률
 \vec{A} : 자기벡터포텐셜, σ : 도전율,
 ϕ : 전기 스칼라포텐셜

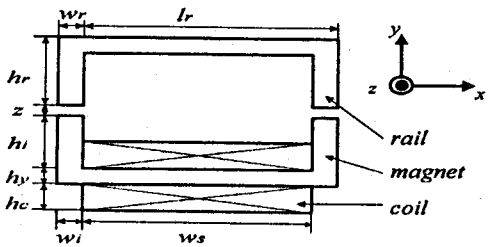
이때, 전자석의 여자전류밀도 J_C 를 진행방향 성분, 즉 Z성분만을 고려하여 J_{Cz} 로 나타내면 전자석의 여자전류밀도 J_{Cz} 와 자기벡터포텐셜 A_z 는 다음과 같이 푸리에급수를 이용하여 나타낸다.

$$J_{Cz} = \sum J_{CN} \exp(jk_N Z) \\ A_z = \sum A_{Nz} \exp(jk_N Z) \quad (2)$$

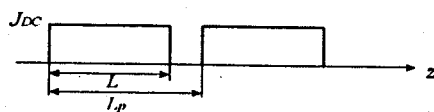
여기서, 첨자 N 은 푸리에급수의 고조파차수를 나타낸다.

$$J_{CN} = (J_{DC} \times L) / L_p + 2 / N\pi \times J_{DC} \sin(k_N L / 2) \\ k_N = 2N\pi / L_p. \quad (3)$$

위에서 (2),(3)식을 (1)에 대입하여 각고조파별로 자기벡터포텐셜 A_z 을 구한후 z 값의 변화에 따른 공극자속밀도의 x, y 방향 성분의 자속밀도를 계산한 다음 맥스웰응력을 이용하여 전자석의 흡인력을 계산하므로써 속도를 고려한 부상력을 얻을 수 있다.



(a) U 자형 전자석의 정면도



(b) DC 여자전류

그림 1. U 자형 전자석과 레일의 해석모델
 Fig. 1. Analysis model of U type magnet and rail

표 1 해석모델의 제원

Table 1 Specification of analysis model

MAGNET	RAIL
coil turn : $N_c = 690$	width : $lr = 0.225$ [m]
pole depth : $hi = 0.077$ [m]	depth : $hr = 0.105$ [m]
coil depth : $hc = 0.065$ [m]	width : $Wr = 0.025$ [m]
pole width : $Wi = 0.025$ [m]	
yoke depth : $hy = 0.038$ [m]	
seperation : $Ws = 0.2$ [m]	

그림 2, 그림 3, 그림 4는 레일과 전자석사이의 공극 및 입력 전류와 부상용 전자석의 주행속도에 따라 유한요소법으로 해석한 부상력특성을 나타낸 것으로서 전자석의 부상력이 입력 전류와 레일과 전자석사이의 공극에 영향받지 않으나 열차의 속도를 가지고 운행할 때 속도에 따라 레일에는 속도기전력이 유기되어 와전류가 공극자속밀도를 감소시켜 부상력이 저하됨을 알 수 있다.

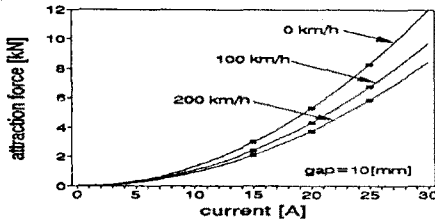


그림 2. 전류변화에 따른 부상력 특성 (공극: 10 [mm])

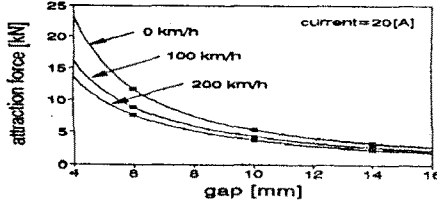


그림 3. 공극변화에 따른 부상력 특성 (전류: 20 [A])

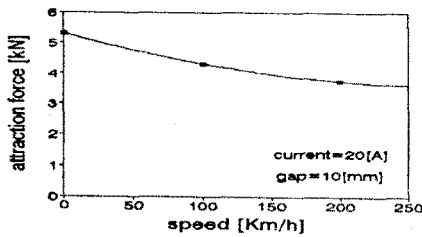


그림 4. 속도변화에 따른 부상력 특성 (전류: 20[A], 공극 10[mm])

위의 해석결과로부터 전자석의 부상력이 입력전류와 레일과 전자석 사이의 공극의 함수뿐만 아니라 열차의 주행속도도 고려된 함수의 꼴로 나타내기 위하여, 그림 2, 3에 의해서 구해진 데이터에 의해 레일과 전자석사이의 공극, 전자석 입력전류, 열차의 주행속도를 고려하여 부상력을 보간하였다.

$$F(i, z, v) = (a_1 + a_2 i + a_3 i^2) \cdot (b_1 + b_2 z + b_3 z^2) \cdot (c_1 + c_2 v + c_3 v^2) \quad (4)$$

- a_1, a_2, a_3 : 입력전류에 대한 보간계수
- b_1, b_2, b_3 : 레일과 전자석의 공극에 대한 보간계수
- c_1, c_2, c_3 : 열차의 주행속도에 대한 보간계수

3. 제어시스템의 설계

일반적인 흡인식 자기부상열차 모델에서의 지배방정식은 운동 방정식과 전압방정식으로서 다음과 같이 표현된다.

$$M \ddot{z}(t) = -F(i, z, v) + Mg + f_d(t) \quad (5)$$

$$E(t) = Ri(t) + \frac{d}{dt} [L(z) i(t)] \quad (6)$$

이때 변수는 다음과 같다.

- $F(i, z, v)$: 전자석의 부상력
- M : 부상체 질량
- $L(z)$: 인덕턴스
- R : 전자석 권선저항
- $z(t)$: 전자석과 레일간의 공극
- $i(t)$: 전류
- $E(t)$: 입력전압
- $f_d(t)$: 외란으로 작용하는 힘

또한 속도가 0 [km/h]일때 평형점에서의 전류와 공극을 각각 i_0, z_0 라하고 식(5),(6)을 선형화하여 상태변수를 $\Delta z(t), \Delta \dot{z}(t), \Delta i(t)$ 로 택해서 단일 전자석의 상태방정식을 구해보면 다음과 같다.

$$\begin{bmatrix} \Delta \dot{z}'(t) \\ \Delta z''(t) \\ \Delta i'(t) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 \\ k_z & 0 & -\frac{k_i}{M} \\ 0 & \frac{k_z}{k_i} & -\frac{R}{L_0} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \Delta z(t) \\ \Delta \dot{z}(t) \\ \Delta i(t) \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ 0 & \frac{1}{M} \\ \frac{1}{L_0} & 0 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \Delta E(t) \\ f_d(t) \end{bmatrix} \quad (7)$$

$$L_0 = \frac{\mu_0 N_c^2 A}{2z_0} : \text{안정점에서의 인덕턴스}$$

N_c : 전자석 턴수 A : 전자석 단면적

이때 k_i, k_z 는 각각 평형점에서의 전류와 공극의 미소변화에 대한 변화율로서 다음과 같이 표현된다.

$$k_i = \left. \frac{\partial F(i, z, v)}{\partial i} \right|_{z=z_0, v=0}, \quad k_z = \left. \frac{\partial F(i, z, v)}{\partial z} \right|_{i=i_0, v=0}$$

제어전압을 식(8)과 같이 구성하면 특성방정식은 식(9)과 같이 된다.

$$e = K_p z_{error} + K_v \dot{z} + K_a \ddot{z} + K_I \int z_{error} dt \quad (8)$$

$$p(s) = s^4 + \left(\frac{R}{L_0} + \frac{K_a k_i}{ML_0}\right) s^3 + \left(\frac{K_v k_i}{ML_0}\right) s^2 + \left(\frac{K_p k_i}{ML_0} - \frac{R k_z}{ML_0}\right) s + \frac{K_I k_i}{ML_0} \quad (9)$$

특성다항식의 실근을 $\alpha, 2\alpha$ 라 하고 고유주파수를 ω_n , 감쇠계수를 ζ_n 이라하면, 이들과 제어정수와의 다음과 같은관계로 정리된다.

$$\begin{aligned} K_p &= \frac{ML_0}{k_i} (4\alpha^2 \zeta_n \omega_n + 3\alpha \omega_n^2 + \frac{R k_z}{ML_0}) \\ K_v &= \frac{ML_0}{k_i} (2\alpha^2 + 6\alpha \zeta_n \omega_n + \omega_n^2) \\ K_a &= \frac{ML_0}{k_i} (3\alpha + 2\zeta_n \omega_n - \frac{R}{L_0}) \\ K_I &= \frac{ML_0}{k_i} (2\alpha^2 \omega_n^2) \end{aligned} \quad (10)$$

윗식을 이용하여 특성다항식을 $\alpha = 15, \zeta_n = 0.707, \omega_n = 11.7$ 로 하여 극을 배치하고 제어정수를 구해보면 다음과 같다.

$K_p = 7767.48, K_v = 523.66, K_a = 22.54, K_I = 24229.08$

여기서 K_p, K_v, K_a, K_I 는 각각의 상태변수에 대한 피드백 계수이다.

그러나 자기부상열차가 주행시에 레일에 유기되는 와전류에 의해 부상용 전자석의 부상력이 변화는 그림 5에서 보는바와 같이 평형점을 변화시키게 된다.

따라서 부상용 전자석의 속도특성을 고려한 제어가 요구된다.

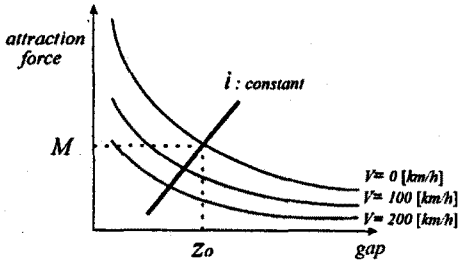


그림 5 흡인력과 공극과의 관계
Fig.5. Relation of attraction force and air gap

부상용 전자석의 주행속도의 증가에 따른 부상력의 변화는 평형점을 변화시킨다. 즉 속도 0 (km/h)에서 구한 부상시스템의 파라미터 k_1, k_2 가 속도가 증가함에 따라 변화하게 되고, 이에 따라 시스템의 제어특성이 변화하게 된다. 따라서 시스템의 파라미터 변화에 대해서도 부상특성이 영향을 받지 않도록 전자석의 속도특성을 고려한 제어를 제안한다.

제안된 제어기는 튜닝형 제어기로서 기존의 제어기의 장점을 살리면서 신경망 학습능력을 이용할 수 있도록 하였다.

자기부상열차의 속도특성을 고려하기 위해서 신경회로망을 이용하여 자기부상열차의 속도에 따라 기존의 집합제어기의 파라미터를 조절하도록 하였다. 사용된 신경회로망은 주행속도를 입력으로 하고 출력을 파라미터의 변화율로 하였으며 각각 5개의 뉴런으로 구성된 2개의 은닉층으로 구성되었다.

신경회로망에 의해서 파라미터가 조절되는 개략적인 제어기의 블록도는 그림 6과 같다

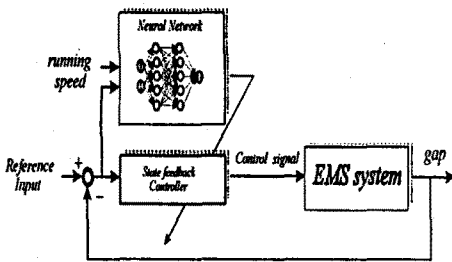


그림 6 제안된 제어기의 블록도
Fig. 6. Block diagram of proposed controller

4. 부상특성

그림 7은 기존의 제어기의 속도변화에 따른 응답특성이다. 그림에서 보는 바와 같이 속도가 0(km/h) 일때는 속도가 200(km/h) 일때에는 부상응답특성이 20%정도 나빠짐을 알 수 있다.

제안된 제어기의 속도에 따른 응답특성이 그림 8에 있다.

그림 9은 제안된 제어기와 기존의 제어기에서 동일외란에 대한 0(km/h), 100(km/h), 200(km/h)에서의 응답특성으로 기존의 제어기는 속도가 증가함에 따라 외란에 대한 응답특성이 나빠짐을 알 수 있다. 그러나 제안된 제어기는 속도의 변화에 대해서도 정지시에 외란에 대한 응답특성과 거의 일치함을 알 수 있다.

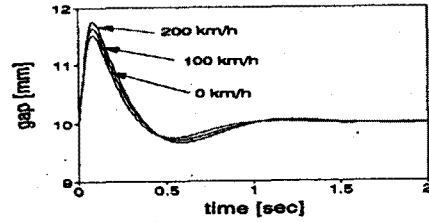


그림 7. 기존의 제어기에 대한 응답특성
Fig. 7. Response characteristics of classical controller.

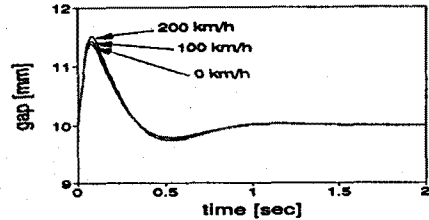


그림 8. 제안된 제어기에 대한 응답특성
Fig. 8. Response characteristics of proposed controller.

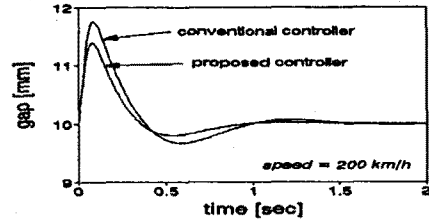


그림 9. 외란에 대한 부상제어특성(20%의 외란을 가한경우)
Fig. 9. Characteristics of levitation control for disturbance

5. 결론

상전도 자기부상시스템에 대하여 속도에 따른 부상력의 특성변화를 유한요소법을 이용하여 해석하였으며, 이결과를 이용하여 속도가 증가함에 따라 레일에 유기되는 와전류에 의한 부상력 감소를 고려한 제어를 설계하였다.

기존의 제어기에 대해 자기부상시스템이 속도를 가지고 운행할 때 동일 외란에 대해서 부상력 감소로 인하여 외란에 대한 응답특성이 저하됨을 볼 수 있다.

그러므로 고속으로 주행하는 MAGLEV에 있어서 속도에 따른 부상력의 감소를 고려한 부상제어가 필요함을 알 수 있었고 이에 따라 속도에 대한 부상력감소의 영향을 고려한 새로 제안된 제어기에서의 보상된 형태의 응답특성을 기존의 제어기와 비교함으로써 새로이 제안된 제어기가 속도의 변화에 따른 영향을 줄여줄 수 있었다.

참고문헌

- [1] 임달호, 김학련, 홍정표, 윤상백, "부상전자석의 자극배치방법에 따른 특성해석" 전기학회논문지 42권 11호, pp. 12-21, 1993.11
- [2] Sinha, P.K, Electromagnetic Suspension Dynamics and Control, Peter Peregrinus Ltd. 1987
- [3] S. Yamamura, K. Ohishi, E. Masada, "Theory of Control control system of Electromagnetically Levitated Bogie-truck", Trans. of IEEJ, vol 99, No.11 pp. 56-63, November 1979
- [4] Im Dal-Ho, Hong Jung-Pyo, Hur Jin, Jung In-Soung, "Levitation Characteristics of Collectively controlled MAGLEV for the Various Speed " LDIA'95, vol. 1, pp. 151-154, June 1995