

자기부상열차의 이산집중제어

임달호*, 홍정표*, 권병일*, °허진, 장석명**
 * 한양대학교 전기공학과 ** 충남대학교 전기공학과

A Study on the Collective Control for the MAGLEV

D. H. Im*, J. P. Hong*, B. I. Kwon*, ° J. Hur*, S. M. Jang*
 *Hanyang Univ. ** Chungnam Nat'l Univ.

Abstract - In conventional maglev system, the individual control system has been adopted. When this control system is applied, it is able to degrade the stability of levitation because of the interference between magnet. And so, it is desirable to be controlled in global, collective control. In doing so, the dynamic suspension characteristics is improved.

In this paper, collective control system using the equivalent inertia is examined and the dynamic characteristic are compared with that of individual control system.

1. 서론

자기부상시스템은 근본적으로 불안정한 시스템으로서 상전도흡인방식은 초전도반발방식에 비하여 부상갭이 작기 때문에 부상시에 필요한 에너지가 초전도 방식에 비하여 적게드는 유리한 점이있다. 그러나, 차체와 적절한 2차 서스펜션에 의해 연결되어있는 부상모듈이 레일의 불균일성이나 레일의 연결부분에서 발생하는 단차, 곡선주행시의 안쪽과 바깥레일의 고저차에 따른 응답성, 주행시에 LIM의 특성변화에 따른 힘의 불평형등으로 인하여 차량의 전체 효율을 저하시키고 시스템을 불안정하게 한다.[1] 작은 갭을 일정하게 유지하면서 이런현상을 최소화하기 위해서는 부상모듈이 적절한 자유도를 가지고 제어되어야할 필요가 있다. 한편, 부상모듈의 마그네트 각각에 대해서 독립적으로 제어를 하게되면 다른 마그네트의 동작에서 오는 외란의 영향을 고려하지못하고 단일 마그네트의 상태만을 고려하여 제어계가 구성되므로 그 제어성능에 한계가 있게 된다.

본 논문에서는 마그네트 상호간 간섭의 영향을 줄이고 외란에 강인한 부상제어계를 구성하기위해 마그네트 간의 결합을 고려하여 집합적으로 제어계를 구성한 후, 외부에서 가해지는 외란을 무게중심의 이동으로 보고 모의실험을 통하여 마그네트가 독립적으로 제어되는 제어계와 부상특성을 비교검토하였다.

2. 마그네트간의 상호결합

부상용 전자석에서 발생하는 흡인력으로 차량을 레일로부터 일정한 공극을 유지하면서 주행하는 상전도 흡인식 자기부상열차는 추진시에 선형유도 전동기에서 발생하는 흡인력과 레일단차등이 차량에 외란으로 작용하여 마그네트 상호간에 간섭을 일으켜서 시스템을 불안정하게 한다. 이런현상을 최소화하기위해서는 레일면에 대해서 부상되어있는 자기부상열차의 상하, 좌우, 로링, 피칭, 요잉, 트위스팅의 6가지 운동의 자유도에 대한 제어가 필요하게 된다. 한편, 부상계와 안내계를 상호 독립이라고보고 안내계와 관련된 좌우운동과 요잉을 제외한 4개의 자유도에 의한 부상계의 부상특성을 검토하기로 하겠다.

자기부상열차 부상시에 4개의 자유도 즉, 상하운동; 피칭, 롤링, 트위스팅은 그림.1을 참조하면 피칭의 경우에 a축, 롤링의 경우에는 b축, 트위스팅에 대해서는 c축을 중심으로하여 질량분포가 변화하는 것으로 볼 수 있다.

따라서, 무게중심의 이동에 의한 회전모멘트를 구하고, 이 회전모멘트를 이용하여 각 모드에 대해 등가적인 관성질량을 구한 후, 각각의 자유도에 대하여 등가 관성질량을 이용하여 제어계를 구성하고자한다.

각각의 등가관성질량에 대하여 운동방정식을 구해보면 식(1)과 같다.[2]

$$\begin{aligned}
 M_h \cdot z_h'' &= -(f_a + f_b + f_c + f_d) + f_{exh} + mg \\
 J_p \cdot \theta_p'' &= -(f_a - f_b + f_c - f_d) \cdot d_p + n_{exp} \quad (1) \\
 J_r \cdot \theta_r'' &= -(f_a + f_b - f_c - f_d) \cdot d_r + n_{er} \\
 M_t \cdot z_t'' &= -(f_a - f_b - f_c + f_d) + f_{ext}
 \end{aligned}$$

h : 상하운동, p : 피칭운동, r : 롤링운동, t : 트위스팅운동
 여기에서 등가 관성모멘트 J_l 과 등가 관성질량 M_l 사이에는 $J_l / d_l^2 = M_l$ ($l=h,p,r,t$)의 관계가 성립하므로 각모드의 등가관성질량을 구할 수 있다. 또한 마그네트의 상하변위 z_k 와 운동모드계의 마그네트 변위 z_l 간에는 다음과 같은 관계가있다.

$$z_i = T \cdot z_k \quad (k=a,b,c,d) \quad (2)$$

여기에서 모드변환행렬 T 는 다음과 같다.

$$T = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 & 1 \\ 1 & -1 & 1 & -1 \\ 1 & 1 & -1 & -1 \\ 1 & -1 & -1 & 1 \end{bmatrix}$$

각 마그네트의 힘을 각 운동모드에서의 힘으로 변환하면 식(3)으로 표현할수 있다.

$$f_i = T \cdot f_k \quad (3)$$

이상에서의 4개의 운동모드에 의한 마그네트 상호결합된 블럭도를 그림.2에 나타내었다.

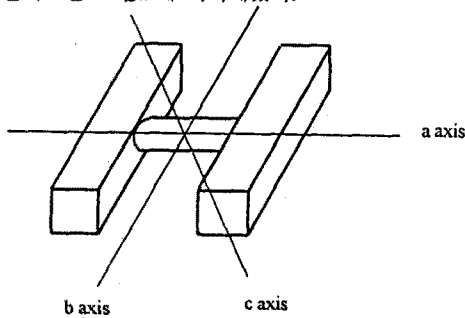


그림 1. 차 량 모델

Fig. 1. Model of vehicle

3. 이산집중제어의 제어계구성

대차를 제어하는 것은 각 마그네트의 흡인력을 제어하는 것으로서 열차의 운동은 각각의 운동방정식에 의해서 표현되나 제어전압은 실 마그네트의 좌표계에서 행해지므로 이를 구해보면, 우선 각 운동방정식에서의 상태변수에 대한 제어전압은

$$e_i = K_{1i} z_i + K_{2i} z_i' + K_{3i} z_i'' \quad (4)$$

로 표현되고 이는 마그네트 변위와 운동모드의 마그네트 변위의 변환식에 의해서 다음과 같이 변환된다.[3]

$$e_k = L \cdot z_k + M \cdot z_k' + N \cdot z_k'' \quad (5)$$

$$L = T \cdot K_{1i} \cdot T^{-1},$$

$$M = T \cdot K_{2i} \cdot T^{-1}$$

$$N = T \cdot K_{3i} \cdot T^{-1}$$

위와같이 구성된 제어전압을 선형화시킨 모델에 적용하여 a 마그네트에 대해서 보면 다음과 같다.

$$z_k' = A_{aa} \cdot z_a + A_{ab} \cdot z_b + A_{ac} \cdot z_c + A_{ad} \cdot z_d \quad (6)$$

$$A_{aa} = \begin{bmatrix} l_1 & 1+m_1 & n_1 \\ C_1 k_{za} & 0 & C_1 k_{ia} \\ 0 & \frac{k_i}{L_0} & \frac{-R}{L_0} \end{bmatrix} \quad A_{ab} = \begin{bmatrix} l_2 & 1+m_2 & n_2 \\ C_2 k_{zb} & 0 & C_2 k_{ib} \\ 0 & \frac{k_{ib}}{L_0} & \frac{-R}{L_0} \end{bmatrix}$$

$$A_{ac} = \begin{bmatrix} l_3 & 1+m_3 & n_3 \\ C_3 k_{zc} & 0 & C_3 k_{ic} \\ 0 & \frac{k_{ic}}{L_0} & \frac{-R}{L_0} \end{bmatrix} \quad A_{ad} = \begin{bmatrix} l_4 & 1+m_4 & n_4 \\ C_4 k_{zd} & 0 & C_4 k_{id} \\ 0 & \frac{k_{id}}{L_0} & \frac{-R}{L_0} \end{bmatrix}$$

$$C_i = T \cdot \left[\frac{1}{M_h} \quad \frac{1}{M_r} \quad \frac{1}{M_p} \quad \frac{1}{M_t} \right]^T$$

b, c, d 마그네트에 대해서도 같은 방법으로 유사한 결과식을 얻을수 있다.

여기에서 A_{aa} 는 해당 마그네트에 의한 영향이고 A_{ab}, A_{ac}, A_{ad} 는 각각 b, c, d 의 마그네트의 부상값의 변화에 의해서 a 마그네트가 받는 영향을 고려한 항이 된다.

마그네트 상호결합에 의해 모드변환된 자기부상열차의 각운동모드에서 열차의 4조의 마그네트가 모두 동일조건일 경우에는 피칭운동, 롤링운동, 트위스팅운동에 의한 운동모드에서의힘은 없게되고 따라서 위식에 의해서 A_{ab}, A_{ac}, A_{ad} 의 항은 0이 되고, 상하운동의 힘에 의한 마그네트 각각에 대해서 부상되는 독립적인 제어가 된다. 그러나 외란이 주어질 경우에는 각 마그네트

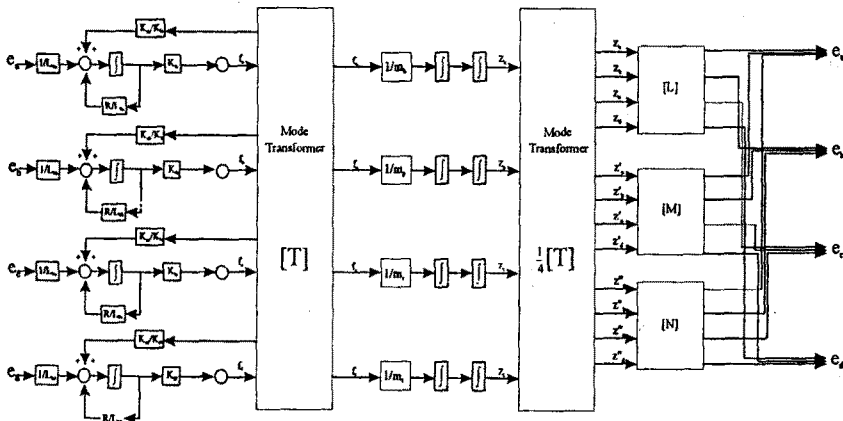


그림 2. 집합제어계 블럭도

Fig. 2. Block diagram of collective control

는 다른 마그네트에 영향을 주게되고, 이때 열차의 상태는 위의 4개의 운동모드에 의해서 각각의 운동모드로 분리되어 제어되어 진다.

식(2)에서 보듯이 제어전압은 4점의 마그네트의 갭에 의해서 구성되어지고, 각각의 마그네트의 제어전압은 다른마그네트의 갭의 영향을 받게된다.

4. 모의실험

전절에서 모델링된 자기부상열차에서 각각의 마그네트별로 독립적으로 제어계를 구성한 독립제어와 마그네트 상호간의 영향을 고려하여 제어계를 구성한 집중제어와의 초기 부상시의 특성과 외란에 대한 부상응답특성을 그림. 3에 나타내었다.

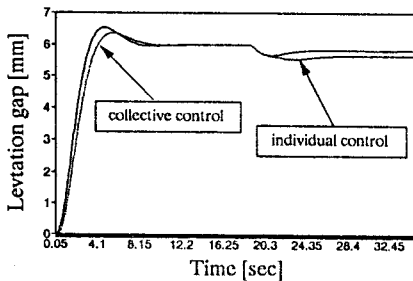
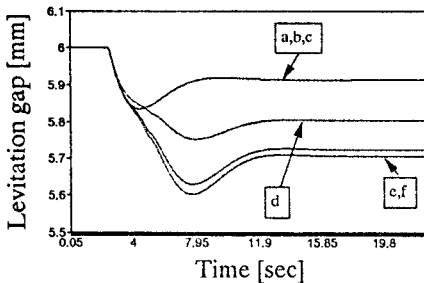


그림 3. 외란에 대한 마그네트의 응답특성
Fig.3 The response curve of magnet according to the variation of external force



a, b, c : 모듈길이 $d_1 = 2, 3, 4$ [m] 일때
집합 제어계에 대한 마그네트 변위의 응답특성
d, e, f : 모듈길이 $d_1 = 2, 3, 4$ [m] 일때
독립 제어계에 대한 마그네트 변위의 응답특성
그림 4. 모듈길이의 변화에 따른 마그네트의 응답특성
Fig.4. The response curve of magnet a according to the variation of the module length

그림3.4에서 알 수 있듯이 초기 부상시에 응답특성 및 외란에 대한 응답성에서 이산집중제어가 독립제어보다 수렴성과 강인성에서 좋은특성을 보여주고 있다.

또한, 등가관성질량을 이용한 이산집중제어를 행할 때 등가관성질량에 따라서 제어에 대한 응답특성이 변화하는 것을 볼 수있다.

즉 독립제어의 경우 모듈길이의 변화에 따라 외란에 대한 응답에 차이가 많으나 이산집중제어에서는 큰 차이가 없게 나타남을 볼수있다. 이는 모듈의 길이 변화가 마그네트 상호간의 간섭의 정도를 결정하는 중요한 요소로서 마그네트간의 간섭의 정도가 클수록 독립제어를 하는것보다 이산집중제어를 하는것이 필요함을 나타내 준다.

표 1. 시물레이션 제원

Table 1. Dimensions of Simulation vehicle.

코일턴수	N	690	[turns]
자극폭	Ws	25	[mm]
자극길이	Wp	640	[mm]
인덕턴스	L	0.89	[H]
저항	R	1.9	[Ohm]
피칭등가질량	Mp	2001	[kg]
롤링등가질량	Mr	4041	[kg]
트위스팅등가질량	Mt	4335	[kg]
정상상태전류	io	17	[A]
정상상태 gap	zo	10	[mm]

5. 결론

본 연구에서는 자기부상시스템을 등가관성질량을 이용하여 각 마그네트의 상호결합을 고려한 집합제어계를 구성하여 부상특성을 검토하였다. 검토결과, 초기 부상시에 응답특성 및 외란에 대한 응답성에서 이산집중제어가 독립제어보다 수렴성과 강인성에서 좋은 특성을 나타냄을 알 수 있었다. 또한, 등가관성질량을 이용한 이산집중제어를 행할때 등가관성질량에 따라서 제어에 대한 응답특성이 변화하는 것을 볼 수있었다.

참고문헌

- [1] T. Nakagawa, S. Yamamura, K. Nakanshi, "Control Method for a Twist Response Type of Electromagnetically Levitated Truck and Experiments using Digital Control Theory", Trans. of IEEJ, vol 107, No.3 pp411-418, 1987
- [2] S. Yamamura, K. Ohishi, E. Masada, "Theory of control system of Electromagnetically Levitated Bogie-truck", Trans. of IEEJ, vol 99, No.11 pp56-63, November 1979
- [3] S. Yamamura, K. Ohishi, T. Nagao, "Collective Control and Independent Control of Electromagnetically Levitated Truck", Trans. of JIEE, vol 101 No.2 pp49-55, February 1981

* 이 연구는 한국과학재단 연구비 지원에 의한 일부 결과임.
(과제번호 92-47-00-02)