

횡자속 영구자석형 자기부상전자석 시스템의 공극제어에 관한 연구

A Study on Air-gap Control for Transverse Flux Permanent Magnet Type Magnetic Levitation Electromagnet System

이재원¹, 김명재², 황선환^{3*}

Jae-Won Lee¹, Myeong-Jae Kim², Seon-Hwan Hwang^{3*}

〈Abstract〉

In this paper, we proposes a study on air gap control for magnetic levitation of transverse flux permanent magnet electromagnets. In general, mechanical systems have a high failure rate of bearings. Bearings in particular are problematic because they have high surface wear rate and degradations. To solve this problem, replacing the bearing with a magnetic levitation electromagnet system can provide lightweight and efficiency improvements. However, precise air gap control is essential to control the magnetic levitation electromagnet system. Therefore, in this paper, we identify the instable cause of gap control through a mathematical modeling and verify through experiment a control algorithm that can use compensation.

Keywords : Transverse Flux Permanent Magnet Type Electormagnet, Magnetic Levitation, Air-Gap Control, Air-Gap Sensor, Electromagnetic Force

1 정회원, 주저자, 경남대학교 전기공학과, 석사과정
E-mail: jw501@naver.com

2 정회원, 공동저자, 경남대학교 전기공학과, 석사과정
E-mail: Sofesimon@naver.com

3* 정회원, 교신저자, 경남대학교 전기공학과, 교수
E-mail: seonhwan@kyungnam.ac.kr

1 MS Course in Electrical Engineering, Kyungnam University\

2 MS Course in Electrical Engineering, Kyungnam University

3* Dept. of Electrical Engineering, Kyungnam University

1. 서론

자기부상 전자석 시스템(magnetic levitation electromagnet system)은 전자기력을 이용하여 물체를 부상시키는 장치로서 1970년 이후 활발하게 연구가 진행되어 왔다.

기술의 발전으로 회전기에서 정지기로 전기 접점의 무접점화, 수동제어에서 능동 제어 시스템으로 발전되어 가고 있다. 이러한 현대산업의 요구조건에 일치하는 자기부상 전자석 시스템으로 물체를 부상시키기 때문에 회전기의 기계적 마찰에 의한 마모를 줄여 시스템의 수명 증가 및 유지보수 비용의 절감과 마찰저항, 마찰열 등을 무시함으로써 고속에서도 높은 가속 성능을 낼 수 있다는 이점을 갖는다[1]-[3]. 이러한 이점으로 전자기력을 통한 부상 및 추진하는 자기부상열차의 연구가 활발히 진행되고 있으며, 이송 및 분류 시스템에서도 소규모 물류창고의 효율적인 공간 활용과 장비 고장이나 노후화와 같은 유지 관리 비용 문제를 자기부상 기술을 채택하여 개발하고 있는 등 다양한 산업 분야에 응용되고 있다[4][5].

하지만 자기부상 전자석 시스템은 본질적으로 비선형성이 강한 불안정한 시스템으로 시스템 안정화 및 신뢰성 확보를 위한 정밀한 공극 제어 알고리즘이 필수적이며, 전자석과 부상체 사이에 작

용하는 전자기력에 대한 정보를 명확히 알고 있어야 부상체의 위치와 무게가 변해도 안정된 제어 성능을 가질 수 있다. 또한 자기부상 전자석 시스템의 선형화 과정에서 필연적으로 모델링 오차가 발생하며 이러한 모델링 오차나 외란 등에 대하여 양호한 제어성능을 만족할 수 있어야 한다[6]-[10]. 따라서 자기부상 시스템의 실제 적용 가능성을 보장하면서 동시에 장기적으로 발생할 수 있는 문제를 해결할 수 있는 기술적인 해법이 필요하다.

본 논문에서는 Fig. 1과 같이 자기부상 전자석 시스템을 구성하여 공극 제어 시 불안정성 원인의 분석 및 시스템의 자기력의 특성상 존재하는 비선형성 해석을 위해 Taylor 급수 전개를 이용하여 선형화하여 수학적 모델을 수립하고 제어 알고리즘 및 디지털 제어기 구현을 통해 공극 제어 알고리즘 신뢰성을 검증하였다.

2. 본론

2.1 자기부상 전자석의 수학적 모델링

2.1.1 자기회로의 동작 특성

자기부상 전자석 시스템의 자기 등가회로를 Fig. 2에 나타내었으며, 전자석 E-1에 의해 발생

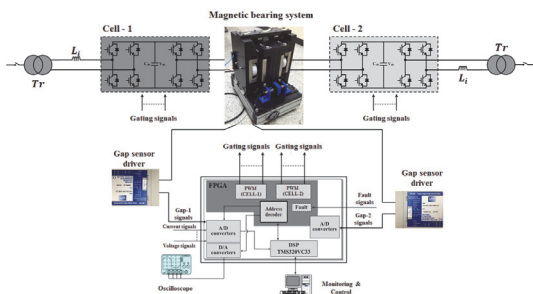


Fig. 1 Overall system block diagram of prototype magnetic bearing

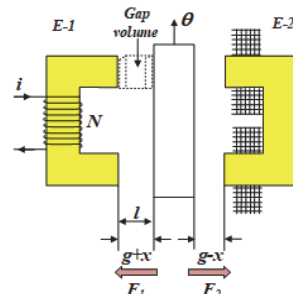


Fig. 2 Equivalent circuit of magnetic levitation electromagnet system

하는 자속은 식(1)과 같이 나타내었다.

$$\psi_1 = \frac{iN}{2R_g} = \frac{iN}{2} \frac{\mu_0 A}{g-x} \quad (1)$$

여기서 ψ_1 은 전자석 E-1의 자속, i 는 전자석 E-1의 코일에 흐르는 전류, N 은 코일의 턴 수, μ_0 은 진공 상태에서의 투자율, R_g 는 자기저항, A 는 전자석의 면적, g 는 자로의 길이, 그리고 x 는 자기부상 전자석 시스템의 이동자 변위이다.

전자석 E-1 코일의 쇄교자속은 코일의 턴 수 및 코일에 흐르는 전류에 의해 식(2)로 표현된다.

$$\lambda_1 = \frac{N^2 i}{2} \frac{\mu_0 A}{g-x} \quad (2)$$

코일에 흐르는 전류와 쇄교자속의 비례상수로 인덕턴스는 식(2)로부터 식(3)과 같이 다시 정리된다.

$$L = \frac{N^2}{2} \frac{\mu_0 A}{g-x} \quad (3)$$

이때, 자기부상 전자석 시스템의 공극에 비해 이동자 변위 x 가 작을 경우, 테일러급수 전개를 적용하여 식(4)와 같이 표현할 수 있으며, 이를 통해 첫 번째와 두 번째 항만 고려한 인덕턴스는 식(5)으로 근사화하여 표현이 가능하다.

$$\frac{1}{g-x} = \frac{1}{g} \left(1 + \frac{x}{g} + \left(\frac{x}{g}\right)^2 + \left(\frac{x}{g}\right)^3 + \dots \right) \quad (4)$$

$$L = L_0 \left(1 + \frac{x}{g} \right), \quad L_0 = \frac{N^2 \mu_0 A}{2g} \quad (5)$$

여기서, L_0 에 의해 공극에 저장된 자계 에너지 W' 는 식(6)과 같이 표현할 수 있다.

$$W' = \frac{1}{2} L i^2 \quad (6)$$

식(6)의 자계 에너지 W' 로부터 발생된 전자기력 F 와 그에 의한 이동자 변위 x 에 대한 인덕턴스 L 의 변화는 식(7) 및 식(8)과 같다.

$$F = \frac{\partial W'}{\partial x} = \frac{\partial L}{\partial x} \frac{i^2}{2} \quad (7)$$

$$\frac{\partial L}{\partial x} = \frac{L_0}{g} \quad (8)$$

식(7) 및 식(8)을 통하여 자계 에너지에서 발생하는 전자기력의 크기를 식(8)로 나타낼 수 있다.

$$F = \frac{L_0}{g} \frac{i^2}{2} \quad (9)$$

식(9)에서 볼 수 있듯이 자기부상 전자석 시스템의 공극과 전류 변화에 따른 전자기력의 크기는 비선형 관계를 가짐을 알 수 있다. 공극에서 발생한 전자기력의 경우 전자석 입력 전류의 제곱에 비례하며, 전류의 입력이 일정한 경우 공극 변위에 따라 반비례함을 보여준다.

2.1.2 이동자 변위 x 에 대한 전자기력

앞 절에서 유도한 공극과 전자기력의 비선형 관계식은 자기부상 전자석 시스템의 이동자 변위 x 의 인덕턴스 변화를 무시하여 출력된 결과이며, 이동자 변위 x 는 전자기력에 직접적인 영향을 미치므로 이에 대한 추가적인 분석이 필요하다.

식(4)에서 자기부상 전자석 시스템의 안정성에 영향을 미치는 세 번째 항 이상의 성분에 대한 인덕턴스는 식(10)과 같이 정의할 수 있다.

$$L = L_0 \left(1 + \frac{x}{g} + \left(\frac{x}{g}\right)^2 \right) \quad (10)$$

이에 따라 자계 에너지 및 자계 에너지의 변화에 따른 전자기력은 식(11) 및 식(12)와 같다.

$$W = \frac{1}{2} i^2 L_0 \left[1 + \frac{x}{g} + \left(\frac{x}{g} \right)^2 \right] \quad (11)$$

$$F = \frac{L_0}{2g} i^2 + \frac{L_0}{g^2} i^2 x \quad (12)$$

식(12)에서 볼 수 있듯이 이동자 변위 x 에 의한 전자기력이 자기부상 전자석 시스템에 불안정한 특성을 야기하며, 식(12)를 특정 동작점에서 선형화된 전자기력으로 표현하면 식(13)으로 나타낼 수 있다.

$$F = k_i i + k_x x \quad (13)$$

여기서, k_i 는 전류 강성이며 k_x 는 변위 강성이다.

2.1.3 자기부상 전자석의 운동 방정식

흡인식자기부상 전자석 시스템의 운동방정식과 블록도를 식(14) 및 Fig. 3에 나타내었다.

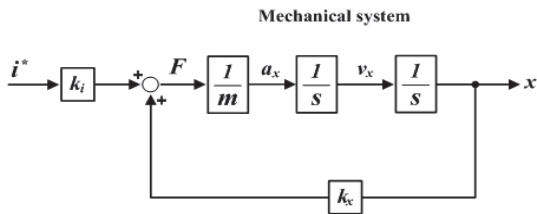


Fig. 3 Block diagram of magnetic levitation electromagnet system

$$F = m \frac{dx^2}{dt} + f_d \quad (14)$$

여기서, m 은 이동자 무게이며, f_d 는 외란을 뜻한다.

3. 자기부상 전자석의 디지털 제어기 설계

3.1.1 자기부상 전자석의 전압 방정식

자기부상 전자석 시스템은 자체적으로 부상 상

태의 유지가 불가능하기 때문에 공극 센서를 이용하여 파악한 이동자의 위치를 통한 피드백 제어기의 사용이 필수적이다. 이러한 피드백 제어를 포함한 자기부상 전자석 시스템의 전체 제어 블록도는 Fig. 4과 같다. Fig. 4에서 알 수 있듯이 자기부상 전자석 시스템의 전압 방정식은 식(15)와 같이 정리할 수 있다.

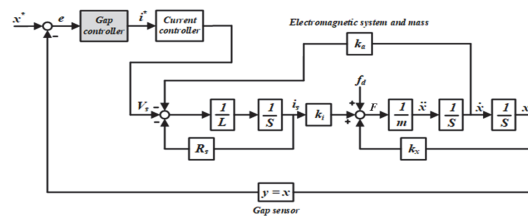


Fig. 4 Control block diagram of magnetic levitation electromagnet system

$$V_s = R_s i_s + \frac{d\lambda_s}{dt} \quad (15)$$

여기서, V_s 는 인가 전압, λ_s 는 쇄교자속, i_s 는 코일에 흐르는 상전류, R_s 는 고정자 권선 저항이다.

이때, 식(15)의 자기회로가 선형적이고 누설자속이 없다고 가정하면 식(16)과 같이 표현할 수 있다.

$$V_s = R_s i_s + L_s(x) \frac{di_s}{dt} + i_s \frac{dL_s(x)}{dx} \frac{dx}{dt} \quad (16)$$

자기부상 전자석 시스템의 전류에 따른 자속 포화가 없을 경우 전류 변화에 따른 인덕턴스를 일정한 계수로 표현이 가능하며 이동자 변위량이 작을 때 전압 방정식은 식(17)과 같이 간략화를 할 수 있으며, 이를 라플라스 변환하면 식(18)을 얻을 수 있다.

$$V_s = R_s i_s + L_s(x) \frac{di_s}{dt} \quad (17)$$

$$\frac{I_s(s)}{V_s(s)} = \frac{1}{R_s + L_s s} = \frac{1/R_s}{1 + \tau_c s} \quad (18)$$

여기서, $\tau_c = L_s/R_s$ 로 전자석의 전기적 시정 수이다.

3.1.2 자기부상 전자석의 공극 제어기

식(17)을 보면 자기부상 전자석 시스템의 공극 제어를 위해서는 미분 요소가 필수적이다. 이를 반영한 공극 제어기의 블록도는 Fig. 5와 같다. PD 제어기 적용 시 공극 제어를 위한 전달함수는 다음과 같다.

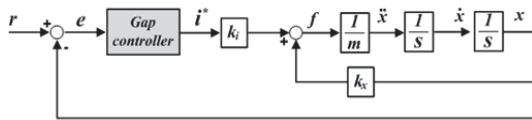


Fig. 5 PID Control block diagram of magnetic levitation electromagnet system

$$G_{c(s)} = K_{pq} + T_d s \quad (19)$$

공극 제어기를 적용한 자기부상 전자석 시스템 안정성 계산을 위한 페루프 전달함수는 식(20)과 같다.

$$G_{c(s)}^c = \frac{x(s)}{x^*(s)} = \frac{(K_{pq} + T_d s) \times k_i}{(ms^2 - k_x) + (K_{pq} + T_d s) \times k_i} \quad (20)$$

$$= \frac{(K_{pq} + T_d s) \times k_i}{ms^2 + s T_d k_i + (K_{pq} k_i - k_x)}$$

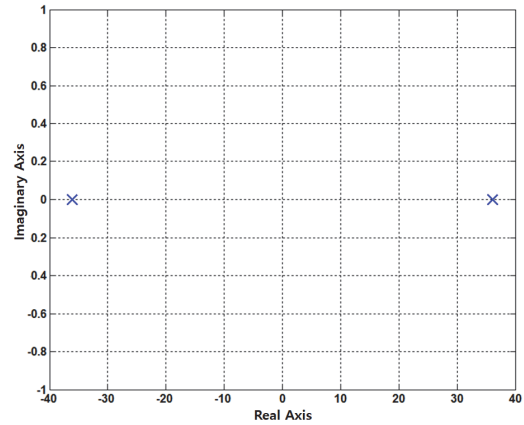
식(20)으로부터 특성 방정식은 식(21)과 같다.

$$ms^2 + s T_d k_i + (K_{pq} k_i - k_x) = 0 \quad (21)$$

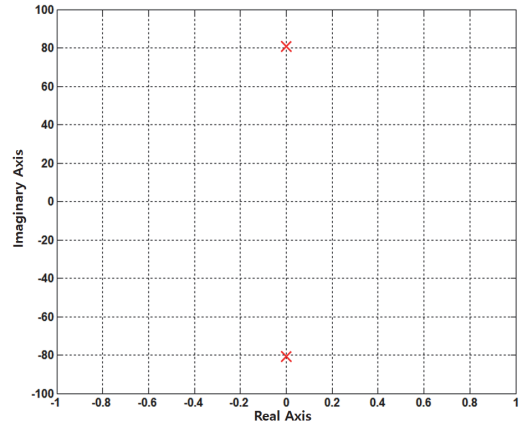
식(21)을 통해 자기부상 전자석 시스템의 안정성을 알아보기 위한 조건은 아래와 같이 표현할 수 있다.

1. T_d 및 K_{pq} 가 0인 경우

특성 방정식의 근은 식(22)로 나타나며, 식(22) 및 Fig. 6에서 알 수 있듯이 조건1의 경우 우반 평면에 극점이 존재하므로 시스템이 불안정하게 된다.



(a)



(b)

Fig. 6 Root locus analysis. (a) condition, (b) condition2

$$s = \pm \sqrt{4mk_x} \quad (22)$$

2. T_d 가 0이고 $K_{pq} k_i - k_x > 0$ 인 경우

특성 방정식의 근은 식(23)과 같이 나타나며, 식(23) 및 Fig. 6에서 볼 수 있듯이 조건2의 경우

두 극점이 허수축에 위치하기 때문에 안정된 영역에서의 사용이 불가능하다.

$$s = \pm j \sqrt{4m(K_{pq}k_i - k_x)} \quad (23)$$

3. T_d 가 양수이고 $K_{pq}k_i - k_x > 0$ 인 경우

특성 방정식의 근은 식(24)와 같고, 식(24) 및 Fig. 7에서 볼 수 있듯이 시스템의 두 극점이 좌반 평면에 위치하기 때문에 안정적인 시스템의 동작이 가능하다.

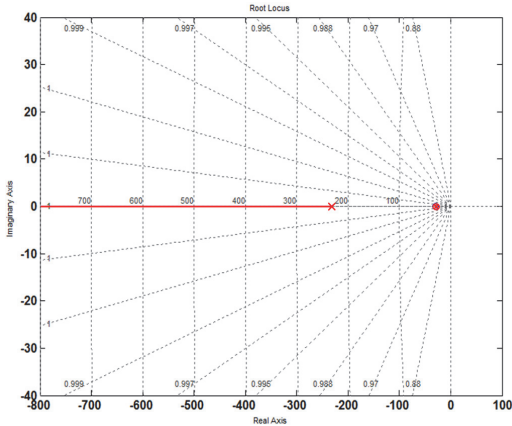


Fig. 7 Root locus analysis of condition3

$$s = -T_d k_i \pm \sqrt{(T_d k_i)^2 - 4m(K_{pq}k_i - k_x)} \quad (24)$$

이에 따라 자기부상 전자석 시스템의 안정적인 동작을 위해서는 미분 성분이 필요함을 알 수 있다.

4. 실험

4.1.1 실험장치 구성

횡자속 영구자석형 자기부상 전자석의 공극 제어 성능 평가를 위해 자기부상 전자석 시스템을

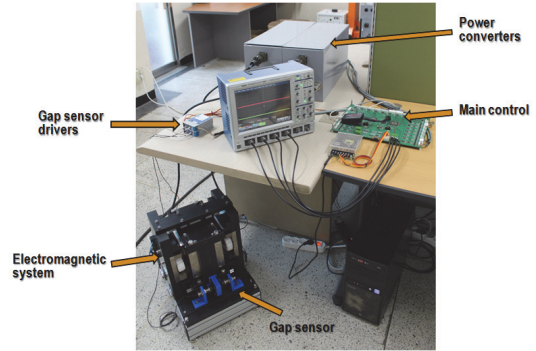


Fig. 8 Overall experiment setup

Table 1. System of gap sensor

Driver model	ECL101
Analog output	0~10 [VDC]
Resolution	0.008 % typical
Linearity	0.05%
Power supply voltage	12~24 [VDC]
Range	8 [mm]
Near gap	1.25 [mm]
Target material	1-6061 Al
Bandwidth	1 [kHz]
Probe model	U25B

구성하였다. 실험 장치는 Fig. 8에서 볼 수 있듯이 이동자의 공극 제어를 위한 링 형태의 권선을 갖는 2개의 전자석, 단상 AD/DC/AC 컨버터, 공극 위치 측정을 위한 갭 센서 및 제어 보드로 구성하였다. 본 실험에 사용된 제어 보드의 프로세서는 TMS320VC33을 이용하였으며, A/D 컨버터를 통해 공극 위치 및 전자석의 입력 전류를 디지털 값으로 변환하였다. 또한 갭 센서는 와전류형 센서로 자세한 사양은 Table 1과 같다.

4.1.2 실험 및 결과

본 논문에서는 횡자속 영구자석형 자기부상 전자석의 PID 공극 제어기 적용 시의 공극 제어 성능 평가를 위하여 일정 공극 제어, 공극 지령 변

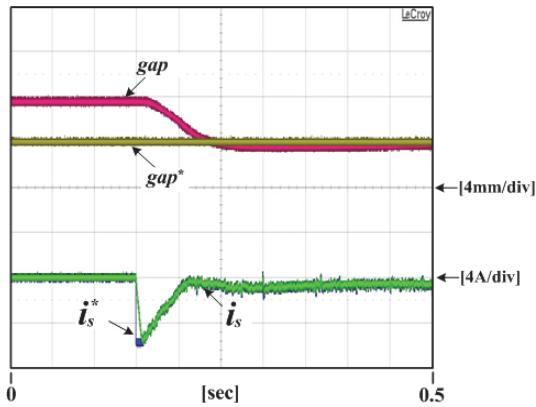


Fig. 9 Constant air gap control test of magnetic levitation electromagnet system

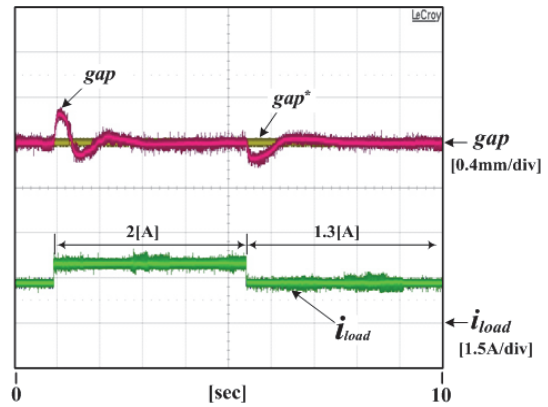


Fig. 11 Bias current variation test of magnetic levitation electromagnet system

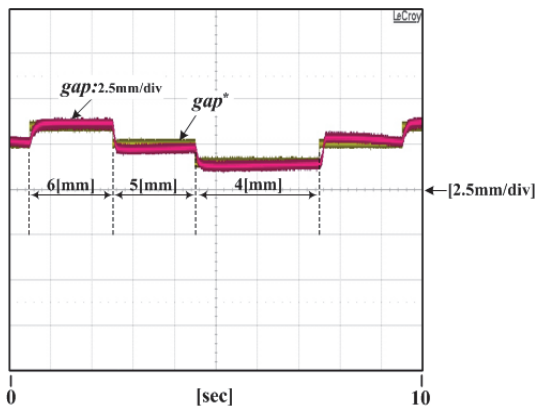


Fig. 10 Air gap reference change test of magnetic levitation electromagnet system

동 및 바이어스 전류 변동 시의 실험을 진행하였으며, 실험은 이동자 무게 29 [kg], 고정자 저항 3.39[Ω], 전류 강성(k_i) 76.878 [N/A], 변위 강성(k_x) 38,439.02 [N/m], 정격 전류 8 [A], 전류 제어기 주기 100 [us], 스위칭 주파수 10 [kHz]의 조건에서 초기 위치 7.6 [mm], 기준 공극 4 [mm]로 설정하여 진행했다.

초기 위치 7.6 [mm]에서 기준 공극 4 [mm]로 지령을 주었을 때 공극과 전류의 파형을 Fig. 9에 나타내었다. Fig. 9에서 알 수 있듯이, 실제 공극

이 지령 공극을 잘 추종하고 있으며 실제 전류 역시 지령 전류에 수렴하고 있음을 알 수 있다. Fig. 10는 운전 중 공극 지령 변동에 따른 실제 공극의 응답 특성을 나타내었으며, Fig. 11은 일정 공극 제어 중 바이어스 전류 변동 시 공극과 전류 파형을 보여주고 있다. Fig. 10과 Fig. 11에서 알 수 있듯이 공극 지령이 스텝 형태로 변동이 생겨도 실제 공극이 값을 잘 추종하고 있으며 일정 공극 제어 시 바이어스 전류의 변동에도 불구하고 기준 공극 값인 4 [mm]로 수렴하고 있음을 확인할 수 있다.

5. 결론

본 논문에서는 자기부상 전자석 시스템을 통해 횡자속 영구자석형 자기부상 전자석의 공극 제어를 위한 기본 개념을 설계하였으며, 특히 디지털 제어기 설계 및 시스템의 안정성과 관련된 내용의 수학적 모델링을 수립하고 실험을 진행하였다.

그 결과, 자기부상 전자석 시스템 공극 제어를 위한 수학적 모델 구성 시 시스템의 불안정성의

원인을 분석하여 미분 요소를 포함한 제어 알고리즘 수립 및 디지털 제어를 구현하고자 하였고, 또한 자기부상 전자석 시스템의 성능 평가를 통해 일정 공극 제어 및 공극 지령 변동, 바이어스 전류 변동에 따른 공극 제어 성능 평가 등의 실험을 통해 공극 제어 알고리즘의 신뢰성을 검증하였다.

사 사

본 연구는 연구개발특구진흥재단의 ‘지역혁신 메가프로젝트’ 사업(과제명: 수소연료전지 기반 하이브리드 분산 전기추진시스템을 활용한 커뮤니티 기술, 과제번호: 2023-DD-UP-0026)과 2023년도 정부(산업통상자원부)의 재원으로 한국에너지기술평가원의 지원을 받아 수행된 연구임(141518667, 최대이륙중량 200kg급 비행체용 순정격출력 30kw급 연료전지 파워팩 시스템 개발).

참고문헌

- [1] A. Chiba, T. Fukao, O. Ichikawa, M. Takemoto and D. G. Dorrell, "Magnetic bearings and bearingless drives", *Newnos*, pp. 1-15, 2005.
- [2] K. B. Kim, S. H. Im, D. Y. Um and G. S. Park, Comparison of Magnetic Levitation Systems Using Ring-Shaped Permanent Magnets, in *IEEE Transactions on Magnetics*, 55(7) pp. 1-4, 2019.
- [3] M. N. O. Sadiku and C. M. Akujubi, "Magnetic levitation," in *IEEE Potentials*, 25(2) pp. 41-42, 2006.
- [4] H. Seo, J. Lim, G. -H. Choe, J. -Y. Choi and J. -H. Jeong, "Algorithm of Linear Induction Motor Control for Low Normal Force of Magnetic Levitation Train Propulsion System," in *IEEE Transactions on Magnetics*, 54(11) pp. 1-4, 2018.
- [5] A. R. Qian, D. C. Yin, P. F. Yang, Y. Lv, Z. C. Tian and P. Shang, "Application of Diamagnetic Levitation Technology in Biological Sciences Research," in *IEEE Transactions on Applied Superconductivity*, 23(1), pp. 3600305-3600305, 2013.
- [6] D. S. Acharya, S. K. Mishra, S. K. Swain and S. Ghosh, Real-Time Implementation of Fractional-Order PID Controller for Magnetic Levitation Plant With Time Delay, in *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, 71 pp. 1-11, 2022.
- [7] L. E. Venghi, G. N. González and F. M. Serra, Implementation and Control of a Magnetic Levitation System, in *IEEE Latin America Transactions*, 14(6) pp. 2651-2656, 2016.
- [8] A. Mohagheghi, H. Javanmardi, S.A.A Safavi, M. Moallem. Air Gap Control of a Magnetic Levitation System using Nonlinear Model Predictive Control, 45th Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society, pp. 286-291, 2019.
- [9] Mrinal Kanti Sarkar, Subrata Banerjee. DSP based implementation of piecewise linear control scheme for wide air-gap control of an electromagnetic levitation system, 41st Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society, pp. 001223-001227, 2015.
- [10] A. El Hajjaji, M. Ouladsine. Modeling and nonlinear control of magnetic levitation systems, in *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 48(4) pp. 831-838, 2001.