

반발식 자기부상 전동기의 강인한 제어전략

방석현*, 엄현종*, 임종석*, 김솔**, 조수연***, 이주*
 한양대*, 유한대**, 자동차부품연구원***

Robust Control Strategy of Repulsive Magnetic Levitation Motor

Seok-Hyeon Bang*, Hyun-Jong Eom*, Jong-Suk Lim*, Sol Kim**, Su-Yeon Cho***, Ju Lee*
 Hanyang university*, Yuhan University**, Korea Automotive Technology Institute***

Abstract - 본 논문에서는 외란발생 시 반발식 자기부상 전동기의 부상 및 속도제어가 각 지령에 맞게 동작하지 않은 것을 실험을 통하여 확인 하였다. 실험에서 부상력은 일정하게 유지되지 않았고, 속도는 지령 속도에 맞춰서 동작하지 않았다. 이를 해결하기 위해 외란 성분을 보상하여 일정한 높이로 부상 하고 일정 속도로 동작 할 수 있는 알고리즘을 연구하였다. 또한 제어안한 알고리즘을 MATLAB/Simulink를 통해 정상적인 동작을 확인함으로써 제안한 제어 알고리즘의 타당성을 검증하였다.

1. 서 론

베어링은 전동기의 및 발전기의 회전을 위한 필수 부품으로 사용되고 있으나, 이는 기계적인 마찰을 가지고 있어서 분진 및 축 손실 등의 문제점을 가지고 있다. 이러한 문제점의 대안 중 하나로 자기부상 전동기가 있다. 이에 따라 국내, 국외에서 자기부상 전동기의 설계 및 제어 연구가 활발히 진행 중 이다.

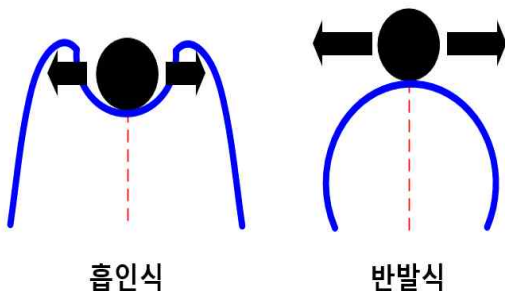
자기부상 전동기는 자기부상의 방법에 따라 흡인식과 반발식으로 분류가 된다. 흡인식 자기부상은 인력을 이용하여 물체를 공중에 띄우는 방식으로 인력과 중력이 같아지는 지점에서 부상한다. 반발식 자기부상은 척력을 이용하여 물체를 공중에 띄우는 방식이며 척력과 중력이 같아지는 지점에서 부상 한다. 또한 흡인식은 두 자석의 인력을 이용하므로 부상을 위한 추가적인 구조물이 필요하지만 반발식은 두 자석의 척력을 이용하기 때문에 부상을 위한 추가적인 구조물이 필요하지 않아 시스템을 단순화 할 수 있다.

본 논문에서는 영구자석을 이용한 반발식 자기부상 전동기를 대상으로 2자유도(z축 부상, z축 회전)제어를 진행하였다.

2. 본 론

2.1 반발식 자기부상

부상제어 시 흡인식 자기부상은 상반되는 극성의 거리가 가까워 질 때 인력이 작용하여 서로 접합하게 되므로 좌우외란에는 강하지만 상하외란에 약한 특성을 가지고 있다. 이에 반하여, 반발식 자기부상은 같은 극성의 마주보는 두 자석의 거리가 가까워질수록 척력이 강하여지므로 좌우외란에는 약하지만, 상하외란에는 강한 특성을 가지고 있다. 따라서 부상 제어 시 반발식



〈그림 1〉 좌우외란에 대한 안정도

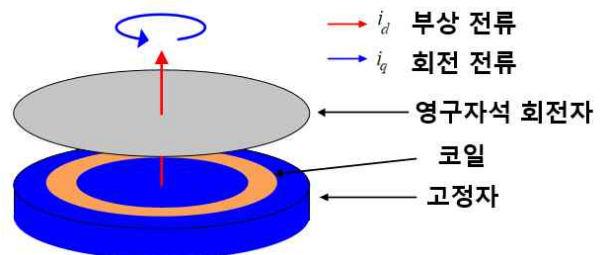
이 흡인식 보다 유리한 특성을 가진다. 그러나 <그림 1>에 흡인식과 반발식의 좌우외란에 대한 안정도 그림에서 알 수 있듯이 반발식은 좌우외란에 안정도가 약하므로 반발식 부상 전동기에서 좌우외란의 안정도는 부상 및 회전 동작의 정확도를 위해 고려해야 하는 중요한 사항이라는 것을 알 수 있다.

2.2 외란에 따른 부상 및 회전 성분의 변화

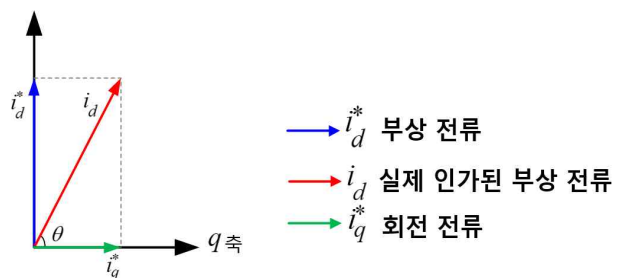
<그림 2>와 같은 형태의 반발식 자기부상 전동기로 부상, 정지 실험을 진행한다. 이때 고정자의 코일에서 발생하는 전류 성분, 전동기의 제작상의 오차와 같은 외란 성분이 발생하게 되면 상하외란에는 강인하지만 좌우외란에는 불안정한 반발부상 전동기에서 동작점이 안정점에서 불안정 점으로 이동하게 되어 전동기 출력이 변화한다. 이로 인해 <그림 3>과 같이 부상전류 i_d^* 가 실제 전동기에서 i_d 전류로 입력된다. 따라서 <그림 2>에서와 같이 회전전류 i_q^* 성분만큼 외란으로 발생되어 부하토크가 추가적인 회전을 발생시키게 된다. 그 결과 부상 후 정지제어가 되지 않고 전동기가 정확한 위치제어가 되지 않는다. 식(1), (2)는 전동기에 실제로 인가된 i_d 부상 전류로 인해 q 축에 외란으로 발생하는 i_q^* 전류와 이를 통해 발생하는 부하토크의 식을 나타 내었다.

$$i_q^* = i_d \cos(\theta) \quad (1)$$

$$T_L = K_q \phi i_q^* = K_q \phi i_d \cos(\theta) \quad (2)$$

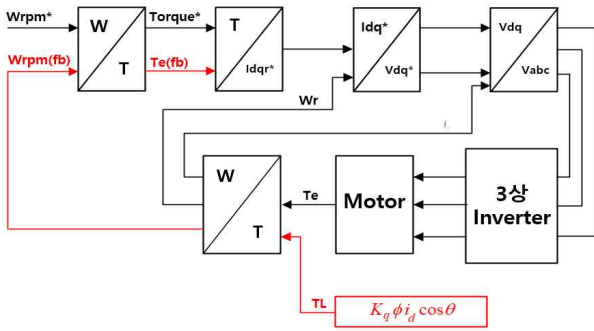


〈그림 2〉 반발식 자기부상 전동기



〈그림 3〉 전동기에 작용하는 전류 성분

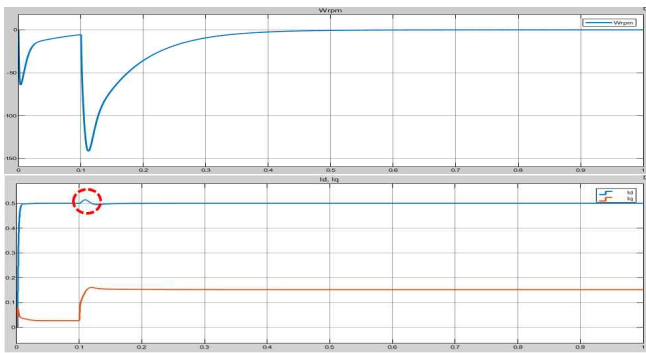
2.3 외란성분에 대한 보상 알고리즘



〈그림 4〉 외란성분에 대한 보상 알고리즘

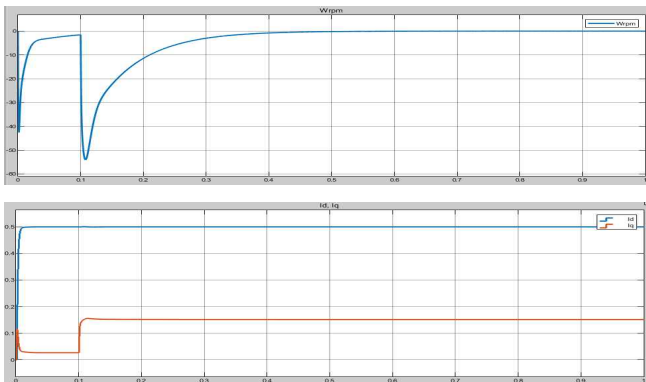
부상 제어 시 외란으로 발생하는 회전전류를 부하토크로 변환하고 이를 보상하는 알고리즘을 구성하였다.

3. 시뮬레이션 및 결과



〈그림 5〉 보상 전 속도, 전류(i_d, i_q) 파형

〈그림 5〉는 외란성분을 보상하기 전의 속도와 i_d, i_q 전류의 파형을 나타내었다. 이때 외란 성분은 〈그림 4〉에서와 같이 부하토크에 순간적인 외란의 발생으로 인한 값($K_q \Phi i_d \cos \theta$)을 인가하여 구현하였다. 속도파형을 보면, 외란으로 인해 전동기가 역방향으로 140rpm까지 회전한 후 0rpm으로 보상되는 것을 확인하였다. 전류파형을 보면, 외란의 발생으로 회전전류 i_q^* 가 증가하여 부상 전류지령 i_d^* 가 0.1초 구간에서〈그림 3〉과 같이 i_d 로 변화하였고 이로 인해 회전자의 부상이 일정하게 유지되지 않는 것을 확인 하였다. 결론적으로, 외란이 전동기의 속도제어와 일정 부상 제어를 방해하는 요소로 작용하는 것을 알 수 있다.



〈그림 6〉 보상 후 속도, 전류(i_d, i_q) 파형

〈그림 6〉은 외란 보상 후 속도와 i_d, i_q 전류의 파형을 나타내었다. 속도파형을 보면, 회전전류 i_q 에 발생한 외란을 보상함으로써 발생한 역방향 회전속도의 최대치가 기존 -140rpm에서 -54rpm으로 감소 후 지령 속도인 0rpm으로 보상이 되는 것을 확인하였다. 전류파형을 보면, 외란으로 발생한 i_q^* 전류 성분을 보상함으로써 부상전류인 i_d^* 전류가 외란의 발생에도 변동 없이 일정하게 유지되어 회전자가 일정한 부상을 유지하는 것을 확인 할 수 있다. 이를 통해 제안한 보상제어 알고리즘이 기존의 속도제어 알고리즘 보다 외란의 영향에서 지령속도로 정확하게 회전하고 일정한 높이로 부상하여 동작하는 것을 확인하였다.

4. 결 론

본 논문은 반발식 자기부상 전동기의 2자유도(Z축 부상, Z축 회전)구동 시에 기존의 속도 및 부상 알고리즘으로는 외란 성분이 발생했을 때 일정부상 및 일정속도로 제어가 되지 않음을 확인 하였다. 본론에서 외란으로 인해 발생하는 회전전류의 변동에 따른 부상전류의 관계를 규정하고 이를 보상하는 알고리즘을 제안하였다. 이 결과로 반발부상 전동기의 회전에 영향을 주는 외란요소가 존재하는 상황에서 제안한 보상 제어 알고리즘을 통한 일정속도 및 일정부상 제어가 기존의 속도 및 부상제어 알고리즘 보다 정확하게 동작하는 것을 확인하였다.

감사의 글

이 논문은 국토부의 재원으로 국토교통과학기술진흥원의 지원을 받아 수행된 연구사업임 (19TBIP-C143153-02)
본 연구는 2017년도 산업통상자원부의 재원으로 한국에너지기술평가원(KETEP)의 지원을 받아 수행한 연구 과제입니다. (No. 20174030201750)

참고 문헌

- [1] 장태혁, 김경민, 김수안, 심병목, 김기병, 박관수, “안정된 공중부양을 위한 반발식 자기부상 시스템 측정 및 분석”, 대한전기학회 학술대회 논문집, 51-52, 2018
- [2] 박현중, 김창현, 노현우, 조수연, 김승주, 이주, “상전도 흡인식 자기부상 시스템의 강인한 부상 제어를 위한 연구”, 대한전기학회 학술대회 논문집, 7호, 1045-1046, 2014
- [3] 안준선, 유선중, 김술 “흡인식 자기부상 시스템의 외란관측자를 이용한 최소전력 부상제어”, 조명전기설비학회 논문지, 23호, 41-47, 2009
- [4] Mark Dyck, Xiaodong Lu, Yusuf Altintas, “Magnetically Levitated Rotary Table With Six Degrees of Freedom”, IEEE/ASME TRANSACTIONS ON MECHATRONICS, Vol22, 530-540, 2017