

# 플라이휠 에너지 저장장치 부상 안정성 분석

## Relative stability analysis of magnetic levitation for flywheel energy storage levitation

\*박병철<sup>1</sup>, 정세용<sup>1</sup>, 한상철<sup>1</sup>, 이정필<sup>1</sup>, 한영희<sup>1</sup>, 박병준<sup>1</sup>

\*B. C. Park<sup>1</sup>(bcpark@kepri.re.kr), S. Y. Jung<sup>1</sup>, S. C. Han<sup>1</sup>, J. P. Lee<sup>1</sup>, Y. H. Han<sup>1</sup>, B. J. Park<sup>1</sup>

<sup>1</sup> 한국전력공사 전력연구원

Key words : flywheel, relative stability, magnetic levitation

### 1. 서론

플라이휠 에너지저장장치는 기계식 배터리로써, 전기에너지를 회전 운동에너지로 변환하여 저장하고 필요할 때 운동에너지를 다시 전기에너지를 변환하여 사용할 수가 있는 전력저장장치로 활용이 가능하다. 최근 신재생에너지 확대보급에 의해 전력저장장치에 대한 관심이 커져가고 있다. 풍력발전, 태양광발전등 신재생에너지는 출력의 변동성이 크기 때문에 전력계통의 직접 접속시 전력품질(주파수)에 영향을 끼칠 수 있어서 전력저장장치의 연계 운전을 통해 전력품질향상이 가능하다.

플라이휠 에너지저장장치의 주요구성부품으로는 전동발전기, 전력변환기, 플라이휠, 베어링등으로 구성되어 있다. 전동발전기는 전기에너지와 회전에너지 상호간 변환하는 역할을 하며, 전력변환기는 전동기 구동 및 발전 전력의 계통연계 또는 부하단 연계 기능을 수행한다. 플라이휠은 회전운동에너지가 저장되는 부위로써, 고강도를 필요로 하여 일반적으로 복합재를 사용한다. 베어링은 볼베어링, 초전도베어링, 전자석베어링방식등이 있다.

플라이휠의 에너지 저장용량은 회전속도의 제곱에 비례하기 때문에 에너지 저장밀도를 향상시키기 위해서는 회전속도를 높이는 것이 필요하며, 이때 회전축을 지지해주는 베어링의 성능은 최대회전속도의 향상에 직접적인 관계를 가지고 있다. 비접촉식 자기부상베어링은 회전속도가 볼베어링에 비해 높으며, 수명이 길고 진공환경에서 적용하기에 적절하여 플라이휠 에너지 저장장치의 베어링으로 장점을 가지고 있다.

자기부상베어링은 feedback 제어가 없으면 기본적으로 불안정한 특성을 가지므로 제어기, 증폭기, 전자석구동기, 위치센서로 구성되어 회전축을 안정적으로 부상시킬 수 있다. 이때 제어기는 자기베어링시스템의 불안정한 pole의 안정한 영역으로 이동시키는 역할을 한다. 본 논문에서 자기베어링에 사용한 제어기는 PD제어기로써, 적절한 P 게인, D 게인을 tuning 함으로써 자기베어링이 안정영역에서 동작하도록 제어기를 설계하였다.

본 논문에서 실험에 사용한 플라이휠 에너지 저장장치의 사진은 Fig 1의 5kWh 플라이휠 에너지 저장장치 시스템이다.

이 자기베어링을 이용한 플라이휠 에너지저장장치는 회전축의 무게가 400kg이고, 정격회전속도가 18,000 rpm으로 설계되어 있다. 일반적으로 자기베어링이 상용화 되었거나, 연구가 진행되고 있는 적용처인 터보진공펌프, 공작기계, 터보압축기 등에 비해 본 논문의 플라이휠 에너지저장장치는 회전관성이 더 크고, 회전체 자체가 대형으로써 회전 실험을 수행할 때 자기베어링의

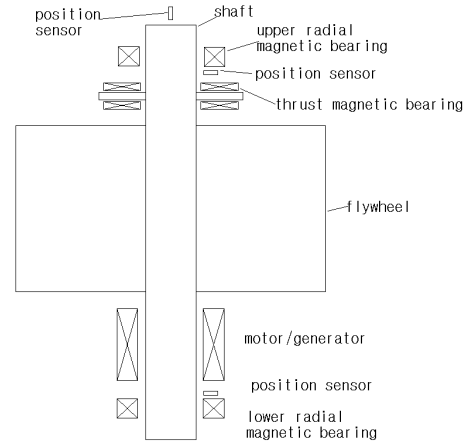


Fig 2 The main components of the flywheel energy storage

불안정에 의한 위험성이 더 크다고 할 수 있다. 이와 같이 본 논문의 플라이휠 에너지 저장장치에 있어서 자기베어링 시스템의 안정성은 플라이휠 시스템의 회전시험 및 운전에서 있어서 중요한 역할을 한다.

국제규격인 ISO는 자기베어링의 상대안정성을 평가하는 규격인 ISO 14839-3을 발행하였다. [1] 이 규격은 자기베어링의 상대안정도의 평가방법 및 기준에 대해 작성한 것으로 자기베어링의 안정성 평가에 적용될 수 있다.

본 논문에서는 5kWh 플라이휠 에너지저장장치의 자기베어링 상대안정도를 측정하기 위해 주파수 응답시험을 하였으며, 이 시험에 의해 얻어진 자기베어링의 open loop 전달함수를 nyquist plot 및 sensitivity 함수에 의해 상대 안정성을 평가 하였다.

### 2. 플라이휠 시스템 구조

Fig 2는 본 논문에서 사용한 플라이휠 에너지저장장치의 주요 구성품들의 개략도를 보여준다. 본 플라이휠 에너지저장장치는 복합재휠, 전동/발전기, 자기베어링, 회전축으로 구성되어 있다. 회전축의 비자성체이며 가공성이 양호한 sus304를 사용하였으며, 플라이휠은 단위 부피당 에너지 저장밀도가 높은 복합재를 사용하였다. 전동/발전기는 slotless형 동기 영구자석 전동/발전기로써 정격출력 30kW, 정격속도 23,000rpm, 최대토크는 12.6 Nm의 성능을 가진다. 본 전동/발전기는 회전손실을 최소화하기위해 slotless형으로 설계/제작 되었다.

본 플라이휠 에너지저장장치는 5축 자기베어링 시스템으로 상부 및 하부에 일반적인 8-pole 반경방향 자기베어링이 장착되어 있으며, 축방향 자기베어링은 영구자석이 상부축 전자석에 조립되어 플라이휠의 자중을 부양해 주는 역할을 한다. 이와 같은 축방향 자기베어링은 플라이휠의 부양에 들어가는 전류량을 감소시켜줌으로써 자기베어링 운용에 들어가는 전력량을 절약하여 주고, 플라이휠 에너지저장시스템의 저장효율을 높여준다. 위치센서는 와전류 위치센서를 사용하였다.

### 3. 상대안정도 이론

주파수영역(frequency domain)에서 feedback 제어시스템의 안정도 평가는 Fig 3과 같은 주파수 응답시험을 통해 시스템의



Fig 1. 5kWh flywheel energy storage

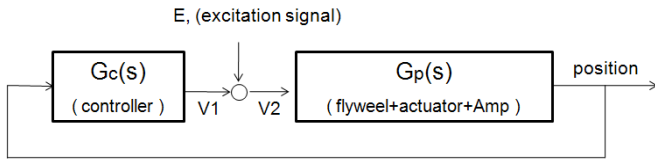


Fig 3 . Block diagram to measure the transfer function of the magnetic bearing system

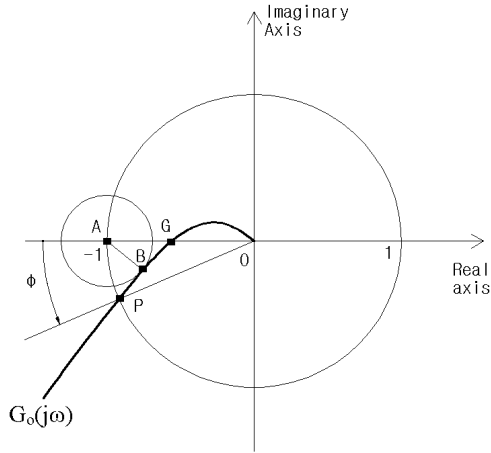


Fig 4. Nyquist plot of the open loop transfer function. [1]

전달함수를 구하여 평가할 수 있다. 이때 가진신호 E를 제어시스템에 주입하여 그때 시스템의 응답을 V1, V2를 측정하여 구할 수 있다. 여기서 가진신호 E는 전 주파수 대역에서 신호의 스펙트럼이 고르게 나오는 white noise를 삽입하거나, 특정 주파수의 정현파를 저주파에서 고주파로 주입하는 sin-sweep 방법이 있다. 본 논문에서는 sin-sweep 방법을 이용하였다. 이때 시스템의 전달함수는 아래와 같이 구할 수 있다. [1]

$$\text{open loop 전달함수: } G_o(s) = -\frac{V_2(s)}{V_1(s)} = G_c(s)G_p(s)$$

$$\text{closed loop 전달함수: } G_c(s) = -\frac{V_2(s)}{E(s)} = \frac{G_o(s)}{1 + G_o(s)}$$

$$\text{sensitivity 함수: } G_s(s) = \frac{V_1(s)}{E(s)} = \frac{1}{1 + G_o(s)}$$

이와 같이 open loop 전달함수를 취득한 후 복소평면에 주파수 응답 데이터를 그려주면 Fig 4와 같은 Nyquist plot을 얻을 수 있다. Nyquist plot에서 open loop 전달함수인  $G_o(j\omega)$ 가 (-1,0) 지점을 에워싸며 지나가게 되면 시스템은 불안정 하다.[2] Fig 4는 (-1,0)을 에워싸며 지나가지 않으므로 안정한 시스템이다. 이때 중심이 원점이고 반지름이 1인 원을 그렸을 때  $G_o(j\omega)$ 와 이 원이 만나는 점에서 phase는 phase margin을 의미하며,  $G_o(j\omega)$ 와 실수축이 만났을 때 (-1,0)지점과의 거리는 gain margin을 의미한다. 여기서 (-1,0) 가장 가까운 지점인 B 지점은 상대안정도가 가장 좋은 지점으로 (-1,0)지점과 B지점의 거리는 이 제어시스템의 상대안정도를 의미한다. 거리가 커지면 상대안정도가 좋아지며, 거리가 작아지면 상대안정도가 나빠진다. 여기에서 (-1,0) 지점과  $G_o(j\omega)$ 와의 거리는 벡터차에 의해  $1+G_o(j\omega)$ 의 크기값으로 나타낼 수 있으며, 이것의 역수는 sensitivity 함수이다. sensitivity 함수가 작으면 상대안정도가 좋은 것을 의미한다.

#### 4. 실험결과

Fig 5는 5kWh 플라이휠 에너지저장시스템 실험에서 취득한 open loop 전달함수의 Nyquist plot 및 sensitivity 함수를 보여준다. 이때 플라이휠을 회전속도 0rpm이고 부상을 한 상태에서 실험하였고 제어기의 p게인: 12, d게인:0.025로 설정하였으며 sin sweep 신호를 제어기 다음단에 주입시켰으며, 이때의 응답인 V1 및 V2를 측정하여 시스템의 전달함수를 구하였다.

측정결과 Fig5의 Nyquist plot을 구하였으며 27Hz에서 (-1,0)과의 거리가 가장 가까웠고, 이때의 좌표값은 (-0.908,-0.213)이었다. 거리의 크기값을 구하면 0.232 이다. Fig 5와 같이 민감도 함수를 구하면 주파수 변화에 따른 상대안정도의 변화를 보다 쉽게 볼 수 있었다. 여기서 27Hz에서 12.7dB 및 14Hz에서 11.9dB로 가장 불안정한 지점이었다. 14Hz 와 27Hz에서 상대안정도가 가장 낮게 나오는 이유는 이 지점에서 자기베어링의 강체모드(cylindrical mode 및 conical mode)가 존재하기때문인 것으로 분석할 수 있다.

#### 5. 결론

본 논문에서는 5kWh 플라이휠 에너지저장 장치에 적용된 자기베어링의 상대안정도를 측정하였다. 측정결과 자기베어링의 natural frequency 해당되는 주파수에서 가장 불안정한 것으로 결과가 나왔으며, 안정성을 향상시키기 위해서는 d게인을 올려 주어 damping 향상시켜주는 것이 필요하다. 이때 d게인을 상승시키면 노이즈 증폭효과에 의해 오히려 상대안정도가 안좋아질 수 있다. 향후 플라이휠이 회전상태에서 상대안정도를 평가하고 d게인을 튜닝 및 제어기를 개선하여 상대안정도를 향상시킬 예정이다.

#### 후기

본 연구는 지식경제부의 전력산업연구개발사업 지원에 의하여 수행되었습니다.

#### 참고문헌

1. "Mechanical vibration - Vibration of rotating machinery equipped with active magnetic bearings - Part 3; Evaluation of stability margin", ISO 14839-3, 2006
2. Dorf R.C. and Bishop R.H., "Modern Control System", Addison Wesley, 8th-edition, pp486, 1998

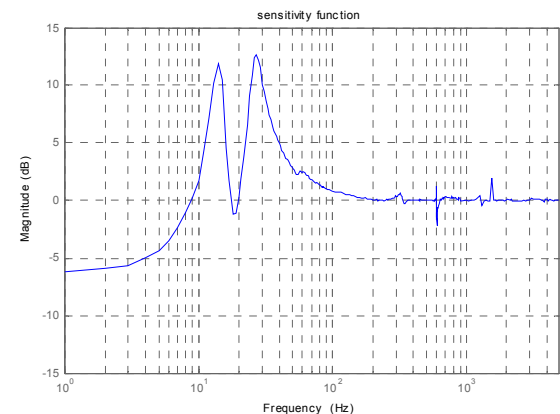
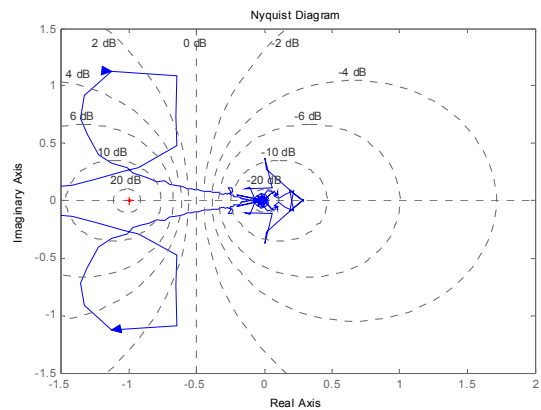


Fig 5. Nyquist plot(upper side) & sensitivity function(lower side) of the 5kWh flywheel energy storage **304**