

플라이휠 에너지 저장시스템의 회전 설계

남궁현*, 최효상*, 성태현**, 한영희**, 이정필**, 한상철**
 조선대학교*, 한전전력연구원**

Rotational Design of the Superconductor Flywheel Energy Storage System

Gueng-Hyun Nam*, Hyo-Sang Choi*, Tae-Hyun Sung**, Young-Hee Han**, Jeong-Pill Lee**, Sang-Chul Han**
 Chosun Uni*, Korea Electric Power Research Institute**

Abstract - The energy storage systems are being widely researched for the electric power. The operations running in a vacuum chamber mainly consists of a composite flywheel rotor, superconductor bearings, a motor/generator and its controller. Among composed the apparatus, the floating magnet bearing consists of the ring-type permanent magnets with epoxy resin impregnation for reinforcement and surface protection. In order to storage as much energy as possible, the flywheel is supposed to be rotated with very high speed. The magnetic field is analyzed by using the Maxwell 2D/3D for the simulations.

1. 서 론

고온초전도 벌크(High Temperature Superconducting Bulk)의 특성인 자속고정력을 응용한 관련전력기기의 개발은 다각적으로 이루어지고 있다. 이러한 연구 중에서도, 고효율의 환경친화적인 기술인 자기베어링을 사용한 플라이휠 에너지저장 시스템에 대한 연구가 활발히 진행 중에 있다.

초전도자기베어링(Superconducting Magnetic Bearing, SMB)시스템에서 필수적인 FMS는 기계적인 접촉과 마찰이 없이 자기적인 설계특성에 의해 고정되어 회전된다. 또한 타 시스템에 비해 복잡한 제어장치가 필요하지 않으며, 구조가 간단하고 제어가 용이하다는 장점이 있다.

이러한 시스템의 구동과 발전은 고속회전이 가능한 플라이휠, 기계적 또는 자기적인 베어링, 에너지 입출력 제어부 등으로 구성된다. 이러한 초전도부상 플라이휠 에너지저장시스템의 구동방식 중 수직축 방식은 고온초전도체 판위에 영구자석이 달린 회전판을 올려놓아 자기력으로 회전체를 들어 올리고 회전판을 수직으로 회전시킴으로써 에너지를 저장하는 방식이다.

이는 중력방향과 회전축의 방향이 동일하기 때문에 베어링이 회전 대칭적인 조건에서 작동되어 진다. 초전도 저널베어링으로만 부양시킬 경우 초전도 베어링의 부피비중이 증가함에 따라, 냉각 및 진공유지 등에 소요되는 비용 등이 오히려 증가되어 효율성이 감소하게 된다[1-3].

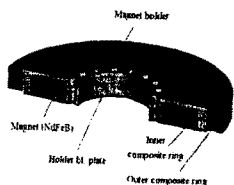
따라서 극성을 상하착자시킨 영구자석 링 간을 S극-N극, N극-S극으로 설계하여 인력으로 인한 floating magnet bearing으로 응용하여 플라이휠의 무게를 감당하도록 시스템이 구성되어 있다. 하지만, 수직형은 안정성과 확장성에 대한 성능평가실험이 필요하기 때문에 구동을 위한 필수적인 시스템의 구성장치인, 자체분포를 발생시키는 원형영구자석(floating magnet bearing)에 관한 연구는 필수적이다. 회전손실 및 초전도체 비용을 최소화하기 위해 극성을 상하착자시킨 원형영구자석은 기존의 할바흐(Halbach)구조보다 영구자석들에 편간의 불균일성에 의한 손실이 최소화시킬 수 있다.

본 연구에서는 자기베어링인 원형 영구자석의 회전자기에 대해 Maxwell 2D/3D 수치해석 프로그램을 사용하여 정자기장 해석을 실시하여 베어링 모델에 대하여 분석하였다[4-5].

2. 본 론

2.1 분석대상 시스템의 개요

본 연구에서 그림 1에서와 같이 영구자석을 베어링 구성요소로 적용함으로써, 초전도체의 비용과 냉각 비용의 절감을 할 수 있다. 또한 개념적으로 설계된 플라이휠 장치의 회전체(휠)는 회전 대칭축이 수직 방향으로 배치된 형태로 구성되어 있다. 이 축을 중심으로 회전축에 직교하는 방향으로 자속분포를 발생시키는 회전자와 고정자로 자기베어링이 구성되어 있다. 이는 중력에 대칭적인 수직형 구조이기 때문에 회전손실절감 및 시스템 설계와 구성 및 가동시 편의성 등의 장점을 가진다. 하지만 이와 같이 구성된 시스템은 빠르게 회전구동 될 때 휠 중량에 따른 고정력과 복원력이 안정성 측면에서 설계되어야 한다.

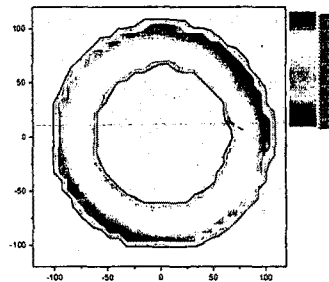


<그림 1> 초전도 플라이휠의 휠축 FMB

2.2 제작된 영구자석 베어링에 대한 파라미터

영구자석의 재질은 잔류자속밀도가 1[Wb/m²] 이상으로 높은 에너지밀도를 갖는 히토류계 NdFe-35(네오디뮴-철)를 사용하였으며, 직교이방성 구조로 된 두께가 얇은 압력용기인 탄소섬유 T700/epoxy와 고강도 Titanium alloy를 사용함으로써 빠른 회전력으로 인한 영구자석의 파손우려를 감소시켰다. 외경 210mm, 내경 120mm, 두께는 회전자 FMB축을 20mm, 고정자 FMB축을 30mm정도로 설계하였다.

그림 2는 가우스메타로 측정된 영구자석의 실제 자속을 나타내는 그림이다. 기존의 8개 회전형 할바흐(out rotor-type Halbach)구조에서 자속손실을 줄이기 위해 상하착자된 단일자석 링형을 사용하여 측정하였다. 그림 2에서의 분포도를 살펴보면 원형의 중심부에서 외부로 갈수록, 자속밀도는 커졌으나, 자속분포도가 영구자석의 제조공정상 특성으로 인하여 약간에 불균일성이 있음을 확인할 수 있었다.



<그림 2> 측정된 영구자석의 자속분포

2.2 영구자석 베어링에 대한 수치해석

영구자석 베어링 모델에 대하여 Maxwell 2D/3D 수치해석 프로그램을 사용하여 정자기력(static magnetic force)을 나타내었다. 이 소프트웨어로 부터 유한요소법을 통해 자기장을 해석하기 위해 영구자석의 각 구역을 그림 3-(a)와 같이 미세메쉬(mesh deformation)로 분할하여 상하착자된 영구자석을 진공내에서 자속밀도 및 자체분포에 대해 분석하였다.

일반적으로 철심 내에서는 자속이 변화하여 철손을 발생되어지나, 본 설계 구조는 철심 없이 자로를 형성하기 때문에 히스테리시스손과 와전류손이 근본적으로 작아 무시할 수 있으므로, Maxwell 2D/3D에서 이러한 재질 값들은 고려되어지지 않았다.

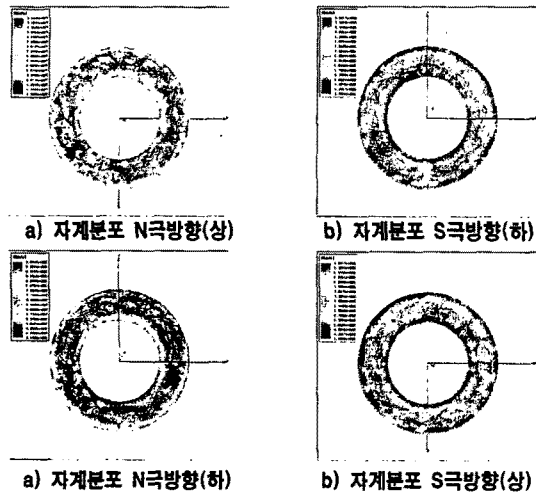
이러한 프로그램의 해석결과를 실제 측정된 데이터와 비교분석하기 위해서는 제작된 영구자석의 B-H자화곡선에 의한 데이터값을 물성데이터로 반영해야 되나, 영구자석의 비가역자화와 비등방성이 고려된 재질데이터가 없기 때문에, 프로그램에 기재된 특성만을 사용하였다.

프로그램내 NdFe-35는 B_r=1.23[T]이며, H_c=-8.9×10⁴[A/m], μ=1.098을 가지도록 자기특성이 설정되어있다. 계산모델들과의 여러 요소에 의한 오차를 줄이기 위하여, 회전자 영구자석을 17,000[rpm]까지 회전시킨 실제데이터를 토대로 프로그램에 의한 계산시에 계산영역과 계산 완료시점을 계산모델에 반영하였다. 자기장 수치해석에 사용되는 모델들인 영구자석만을 3D로 그렸으며, 결과에 영향을 주지 않는 베어링의 다른 비자성체들은 도면에 삽입하지 않았다.



(a) 영구자석의 미세 메쉬 (b) 에너지분포
 <그림 3> FMB 영구자석의 분포 모델

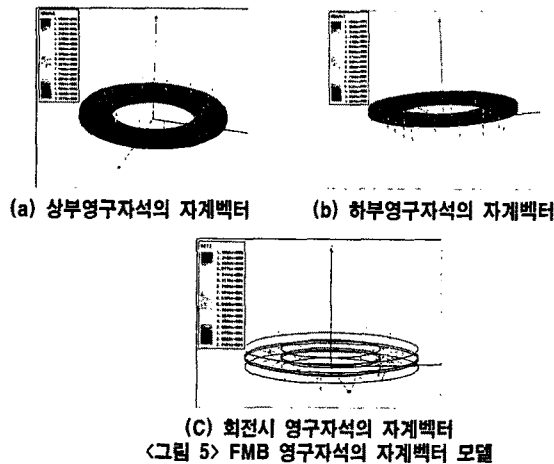
그림 3-(b)는 위의 조건에 의하여 20,000rpm회전시의 에너지 분포도를 나타낸 것이다. S극-N극, N극-S극의 순서로 서로 같은 극끼리 마주보게 자석을 배열함으로써, 자석의 회전에 따라 자속이 자석들 사이에서 나오는 것을 에너지 분포로 확인할 수 있었다. 이는 상하면으로 자석들을 대향 설치함으로써 회전자와 고정자 간에 인력과 척력을 발생시켜, 더 강력한 고정력으로써 안정성을 기여할 것으로 사료된다.



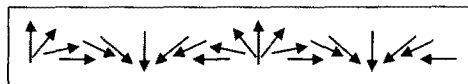
〈그림 4〉 영구자석의 상하구조에 따른 자계분포

그림 4에서 보여주는 바와 같이 고정자의 상부자석면과 회전자의 하부자석면에서 자계벡터가 고정자의 하부자석면과 회전자의 상부자석면에 비해서 더 높은 자계가 분포함을 확인할 수 있었다.

이는 상기 고정자 자석과 회전자 자석 사이에는 각각 자력이 작용하는데, 고정자와 회전자의 외부면에서의 척력에 비해 고정자와 회전자 간격사이에서는 동일 극끼리 인접하도록 조립한 자석배열에 의해 자속이 자석들 사이로 나오므로, 더 강한 고정력을 얻을 수 있음을 재차 확인할 수 있었다.



〈그림 5〉 FMB 영구자석의 자계벡터 모델



〈그림 6〉 회전시 영구자석의 자계벡터 배열

상하착자된 링형 영구자석의 자계벡터는 고정자FMB와 회전자FMB가 상하축을 기준으로 연속적으로 부양시킬 수 있도록 상하착자 방식의 자화를 가지는 것을 그림 5를 통해서 알 수 있었다. 즉 그림 5-c와 같이 자계벡터가 영구자석의 상하로 배열되어 연속적으로 회전하게 되면, 자화벡터 방향이 축에 따라 연속적으로 회전시키므로 고정자와 회전자의 자속벡터에 의해 부양하는 자력이 그림 6와 같이 기존의 Halbach 배열보다 더 정현적인 연속자화를 나타냄으로써, 필요한 형태의 자계분포를 얻을 수 있었다. 따라서, 이러한 링형 영구자석의 자석배열이 기존의 배열에 비해 회전시 손실을 줄일 수 있을 것으로 사료된다.

3. 결 론

본 연구에서는 초전도 에너지 저장시스템의 구성요소 중 자기베어링에 대한 Maxwell 2D/3D 소프트웨어를 이용하여 정자기장 수치해석을 하였다. 이 축을 중심으로 회전축에 직교하는 방향으로 자속분포를 발생시키는 회

전자와 고정자로 자기베어링이 구성되어 있다. 이 시스템은 영구자석을 수직축형 자기베어링에 적용함으로써, 회전 손실 저감, 제작비용 및 냉각비용 절감등의 이점을 가질 수 있었다. 이 축을 중심으로 회전축에 직교하는 방향으로 자속분포를 발생시키는 회전자와 고정자로 자기베어링이 구성되어 있다. 수직형은 안정성과 확장성에 대한 성능평가실험이 필요하기 때문에 구동을 위한 필수적인 시스템의 구성장치인, 자계분포를 발생시키는 원형영구자석(floating magnet bearing)에 대하여 분석하였다.

Maxwell 2D/3D 소프트웨어 프로그램으로 모델화된 S극-N극, N극-S극으로 상하착자로 배열된 영구자석의 회전운전시 자화벡터 방향이 연속적으로 회전함으로써, 기존의 Halbach 배열보다 정현적인 연속자화가 나타남을 확인할 수 있었다. 하지만, 수치해석 프로그램에 따른 모델설정시 영구자석의 비가역자화와 비등방성이 고려된 재질데이터가 없어 프로그램에 기재된 특성만이 사용되었다. 하지만 이러한 결과를 통해 원형 영구자석을 자기베어링에 사용시 회전손실을 줄여들어 보다 안정적인 구동을 할 수 있음을 알 수 있었다. 하지만, 실제 측정된 자화분포에 대한 특성이 제작상 불균일한 특성으로 인해 실제 자화분포에서 일정하지 않음을 알 수 있었다.

이러한 제조상 불균일특성을 고려하지 않았기 때문에, 일정한 자계분포 및 에너지분포값을 얻을 수가 있었다. 따라서 제조기술계속적으로 개선된다면, 이와 같은 우수한 결과값을 가져올 수 있을 것이라 사료된다. 하지만, 정밀한 계산 결과값을 얻기 위해서는 다음 연구에서는 실제측정된 데이터 제작 특성을 프로그램의 모델에 반영할 수 있도록 보다 정밀한 모델을 설계할 것이다.

[참 고 문 헌]

- [1] B. Oswald, M. Krone, et al, "Superconducting Reluctance Motors with YBCO Bulk Material", IEEE Trans, on Applied Superconductivity, Vol 1. 9, No. 2, p.1201-1204, 1999
- [2] 성태현, 이준성, 한영희, 한상철, 최상규, 김영철, 김상준, "고온초전도 베어링을 이용한 수평축 플라이휠에너지 저장장치 시스템", 한국초전도저온공학회논문지, 3권. 1호, 50-54, 2001
- [3] T-H. Sung, J-S. Lee, Y.H Han, S-C Han, S-K Choi, S-J Kim, "300 Wh class superconductor flywheel energy storage system with a horizontal axle", Physic C, p.1451-1456, 2002
- [4] 장석명, 서진호, 박찬일, 최상규, "영구자석의 Halbach 배열에 의한 자기회로 특성과 초고속전동기에의 응용", 대한전기학회 하계학술대회 논문집, p.71-73, 1996
- [5] 이준성, 한영희, 한상철, 성태현, 김상준, "수직축형 플라이휠 시스템을 위한 초전도 하이브리드 베어링의 설계", 한국초전도저온공학회, 3권. 1호, p.22-28, 2001