전력전자학술대회 논문집 1999. 7.21-24

초전도 플라이휠 에너지 저장시스템의 개발

정환명, 연제욱, 최재호, 고창섭
충북대학교 전기공학과

Development of Flywheel Energy Storage System Using Superconducting Magnetic Bearing

Hwanmyoung Jeoung, Jaewook Yeon, Jaeho Choi, Changseop Koh
Department of Electrical Engineering, Chungbuk National University

Abstract

This paper presents a S-FES(Superconducting magnetic bearing Flywheel Energy Storage System) for the purpose of replacing battery used to store the energy. Especially, the design elements of FES, such as the bearing, wheel material, and power converter, etc., is described. The design and manufacturing techniques of the controllable power converter are proposed to generate the sinusoidal output current in the high speed operation and to get the constant DC voltage in the regeneration mode. The cylindrical permanent magnet synchronous motor with halbach array of Nd-Fe-B permanent magnet which is the high coercivity material is used as the driver of FES. The proposed S-FES system shows the stable rotation characteristics at high speed range about 10,000 rpm. To verify the validity of proposed system, the comparative study with the conventional ball bearing system is proceeded and it is well confirmed with the result of the lower friction loss of S-FES system.

1. 서론

최근 하절기 냉방기기의 사용증가 등으로 인해 하루 중 일정시간대에 전력사용이 집중하는 현상은 전원전압의 감소나 순간정전으로 이어져 전력환경의 불안정한 요소로 작용하고 있다. 따라서 무정전전원장치의 사용도 더욱 증가하고 있는 추세이며 보다 안정된 전원환경이 필요하게 되었다. 연축전지는 전반적으로 가격이 낮아 전력 저장장치로써 많이 사용되지만 효율이 60[%] 정도로 낮으며 재생시 필요한 별도 비용이 소요되며 환경적 측면에서 사용시 유해가스를 발생하고 반복 사용시 수명한계가 짧은 등의 단점을 가지고 있다. 한편 이러한 문제점의 대응 방안으로 FES를 들 수 있으며 FES 시스템은 반복사용에 대해 수명이 반영구적이고 오염물질을 발생하지 않아 환경친화적이라는 장점을 갖고 있으나 고속 베어링사용에 제한이 있는 문제가 있다. 최근 초전도 자기부상 베어링을 사용한 연구가 진행되고 있으며 이 경우 에너지손실이 2[%/일]이하로 매우 낮은 것으로 보고되고 있다.[5]

따라서 본 연구에서는 고효율의 초전도 플라이휠 에너지 저장시스템을 구현하고 각 부의 특성과 설계기술을 검토하였다. 플라이휠의 구동용 전동기/발전기로는 높은 잔류 자속밀도를 가지는 Nd-Fe-B 자성체를 사용하여 Halbach 배열로 알려진 영구자석배열을 사용하여 일정하고 높은 공극 자속밀도를 실현한 고효율의 원통형 PMSM(Permanent Magnet Syn-chronous Motor)을 설계제작 하였다. 전력변환기는 전동기의 입력주파수가 약 40-700[Hz] 범위에서 전동발전기의 토오크맥동을 최소화하고 고효율을 실현할 수 있도록 정현파전류로 제어되도록 하였으며 전력회생시에는 직류전압을 일정하게 제어함으로써 기존의 축전지를 사용하는 무정전전원장치(UPS)등에 적용하여 축전지를 대체할 목적의 시스템을 설계 및 제작 하였으며 이와 같은 플라이휠 에너지 저장시스템의 설계시 필수적으로 고려해야 할 제반 요소에 관해 알아보고 실제시스템의 구현을 통해 동작특성을 확인하여 에너지 저장시스템으로써의 가능성을 입증하는 연구를 수행하였다.

2. FES 개요

FES란 전기적인 에너지를 고속으로 회전하는 회전체에 기계적인 회전운동에너지로 저장하고 필요시 회생하여 응용하는 시스템을 말한다. 그림 1에서는 이러한 FES 설계에 있어서 주요하게 고려해야할 항목을 나타낸 것이다. 먼저 많은 에너지를 고효율로 저장하거나 회생하기 위해서는 휠재료, 전동/발전기, 베어링, 전력변환기등이 모두 고속회전 또는 운전이 가능하고 고효율로 동작하도록 설계하지 않으면 안된다. 수십만 rpm의 회전이 가능한 재료라 하여도 전동/발전기 정격에 맞추기가 어렵고 기계손실인 베어링 손실 및 풍손이 증가할 것이고 전력변환기에 의해 전류를 제어하는데 어려움이 따르게 되므로 전체 시스템조건을 고려하여 설계하여야 한다.

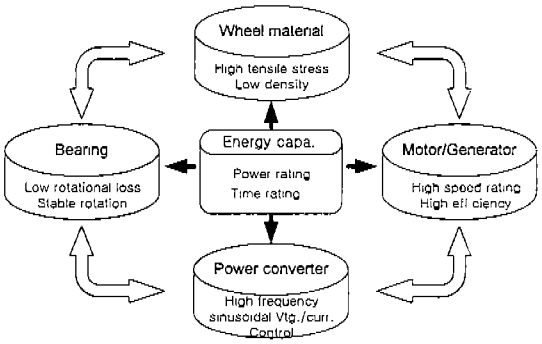

그림 1 플라이휠 에너지 저장시스템의 구성요소

휠 에너지 저장시스템의 응용으로써는 UPS 를 들 수 있는데 항상 여분의 전력을 휠의 기계적 운동에너지로 저장한 다음 전원의 정전이나 전압 새그(sag) 발생시 휠의 기계적 에너지를 전기에너지로 변환하여 부하에 안정된 전력을 공급하게 된다. 또한 심야전력과 같은 잉여의 전력을 야간에는 휠을 가속함으로써 에너지를 저장하고 주간 부하 피이크시에 계통에 전력을 회생함으로써 부하율(Load factor)을 감소시켜 전력예비율을 증가 할 수 있게 됨으로써 전력환경을 개선할 수 있게 된다.

3. 휠 재료의 선정 및 형상

반지름R[m], 무게m[kg], 회전각속도 ω[rad/sec]로 회전하는 회전체가 갖는 회전에 의한 관성에너지는 다음 식과 같이 주어진다.

$$E = \frac{1}{4} m R^2 \omega^2 \ [\mathrm{J}] \qquad (1)$$

식 (1)에서 보는 바와 같이 회전운동에너지는 무게에 비례하고 반지름의 제곱, 회전속도의 제곱에 비례함을 알 수 있으며 베어링의 마찰력이 운동하는 물체의 무게와 비례관계인 것을 함께 고려하면 무게보다는 속도와 반지름을 크게 하는 것이 유리함을 알 수 있다.

한편 이 때 원심력에 의해 물체에 작용하는 응력은 $R^2\omega^2$에 비례하며 재료에 작용하는 최대 응력을 $\sigma_{\max}$[Pa]로 놓고 단위질량 및 단위부피당 저장되는 에너지를 각각 λ_m과 λ_v로 나타내면 식 (2)와 같다.

$$\lambda_m = K_s \cdot \sigma_{\max}/\rho$$
$$\lambda_v = K_s \cdot \sigma_{\max} \qquad (2)$$

식 (2)에서 K_s는 지형인자로써 회전체의 모든 부분에 작용하는 원심력의 크기가 같은 등방성 구조일 경우 1.0의 값을 갖으며 평판 디스크일 경우 0.606의 값을 갖는다. 식 (2)로부터 휠 재료의 최대 인장하중과 밀도를 알면 휠 크기나 속도에 관계없이 최대 저장에너지를 계산할 수 있음을 알 수 있다.[1,2]

그림 2는 본 실험에 사용한 플라이휠의 외형을 나타내고 있다. 식 (2)로부터 에폭시나 그라파이트등이 휠 재료로써 적합함을 알 수 있지만 국내에서 입수하기가 용이하지 않은 실정이다. 따라서 본 연구에서는 금속으로 만든 플라이휠을 사용하고 있으며 휠의 최대회전속도는 40,000[rpm], 중량15[kg], 관성모멘트 0.0984[kg-m^2] 이며 최대 저장에너지는 식 (1)을 이용하면 65[Wh]가 된다.

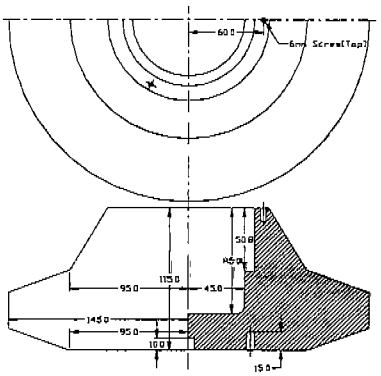

그림 2 플라이휠 부분

4. 베어링의 선정

단시간에 피이크성 전력을 요하는 시스템에 있어서는 저속의 기계적 베어링을 사용하여도 효율에 있어서 그다지 큰 영향을 미치지 않지만 UPS나 심야전

력저장장치와 같이 항상 최대의 저장에너지상태로 회전하여야 하는 시스템에 있어서 베어링에 의해 발생하는 기계적 손실은 그 양이 작다고 하여도 회전하고 있는 동안 손실을 발생하게 되므로 전체 효율에 미치는 영향은 매우 크기 때문에 낮은 베어링손실을 갖는 것이 무엇보다 중요하다고 할 수 있다.

이러한 점에서 영구자석의 덩어리형 고온 초전도체 위에서의 부상력을 이용 할 경우 에너지 손실이 2[%/일]이하로써 매우 낮은 장점이 있다. 또한 고가의 헬륨 대신 가격이 저렴한 액체질소를 사용함으로 운용 단가를 낮게 할 수 있고 회전시 축방향 진동과 반경방향 진동을 동시에 잡아줄 수 있어 별도의 반경방향 베어링을 필요로 하지 않는 장점을 얻을 수 있다. 그림 3 (a)에서는 영구자석과 초전도체사이에 작용하는 힘을 나타낸다.[3] 영구자석의 부상원리는 Meissner 효과와 Pinning 효과를 이용하여 설명되며 그림 3 (b)에서는 Pinning 효과에 의한 부상원리를 보여주고 있다.[4]

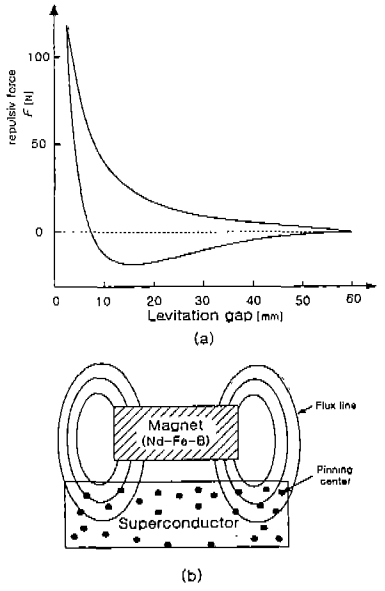

그림 3 (a)영구자석의 부상력 특성
(b)Pinning 효과

5. 전동/발전기의 선정 및 설계

전동/발전기는 에너지 변환에 있어 중요한 요소이며 고속 고효율을 목표로 연구 개발되고 있다. 고속화에서 큰 문제는 철손의 증가를 들 수 있으며 철손 중 와류손은 주파수에 비례하게 되고 히스테리시스 손실은 주파수의 제곱에 비례하는 코어손실을 발생하게 되어 공심코어의 설계가 필요하게 되며 큰 토오크를 얻기 위해서는 공극에서의 자속밀도가 높아야 하며 설계시 권선의 동손 I^2R에 의한 열의 방열에도 주의하여야 한다. 유도기, 동기기, 릴럭턴스전동기등이 전동발전기로써 응용되고 있다. 본 연구에서는 초고속에서 고효율을 실현하기 위해서 Hall-bach Array 영구자석 배열을 갖고 전기자에 공심구조를 갖는 외전형의 PMSM을 선정하였다. 그림4는 영구자석의 배열과 자화벡터 방향을 나타내며 배열 내부에는 높고 균일한 자속밀도가 형성되고 영구자석만으로 폐자로를 구성할 수 있어 고속회전시 발생하는 와류손과 히스테리시스손이 발생하지 않게 된다.

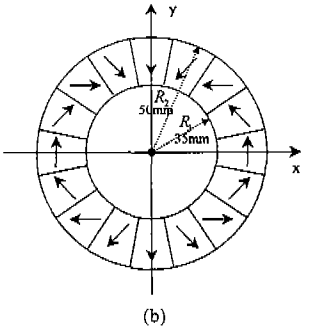

그림 4 Halbach배열 계자 모델

표 1과2에서는 전동/발전기의 설계사양과 결과값을 나타낸다.

표 1 설계사양

최대회전속도	40,000[rpm]
운전속도 범위	30,000~15,000[rpm]
인가전압[V$_L$]	220[V]
가동시간[min]	5분
감속시간[min]	5분

표 2 모터설계 결과

항 목	설 계 결 과
정 격 토 크 [kg-cm]	5.287
평균자속밀도 [T]	0.3489
상 당 저 항 [Ω]	0.495
인 덕 턴 스 [mH]	0.87
정격출력[kW]	1.2
정 격 전 류[A]	3.104

6. 전력변환시스템 구성 및 제어

그림 5는 주 전력회로를 나타내는데 직류측에 전원공급장치와 1[kw]의 저항 부하를 장착하여 에너지 저장과 회생모드에서 동작하도록 하고 있다.

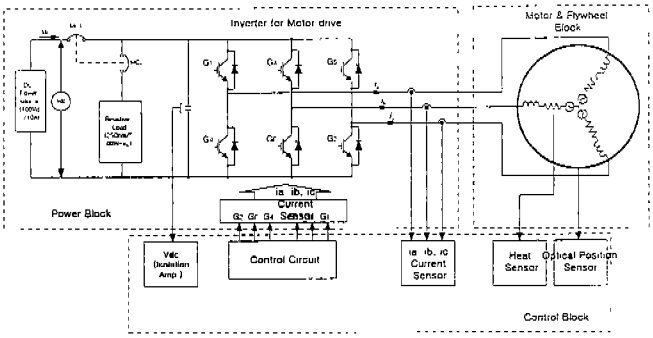

그림 5 실험에 사용한 주전력회로

그림 6에서는 동기전동기의 a상 페이저도를 나타내고 있다.

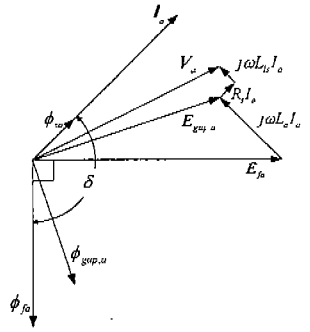

그림 6 영구자석동기전동기의 페이저도

$E_{gap,a}$는 a상 권선과 쇄교함으로써 발생하는 유기기전력을 의미한다. 위 그림으로부터 계자 자속에 의한 a상 유기기전력 e_{fa}는 아래와 같이 주어진다.

$$e_{fa} = \omega N_s \phi_f \cos\omega t = \sqrt{2} E_{fa} \cos\omega t [\mathrm{V}] \quad (3)$$

3상 입력으로부터 기계적인 힘으로 변환되는 전력 P_{em}과 기계적 출력 T_{em}은 식4-5와 같이 주어진다.

$$P_{em} = 3E_{fa} I_a \cos(\delta - 90^\circ)[\mathrm{W}] \quad (4)$$

$$T_{em} = k_t \phi_f I_a \sin\delta \ [\mathrm{N}] \quad (5)$$

따라서 일정 전류로부터 에너지 저장시 최대 효율을 얻기 위해서는 입력전류를 유기기전력 E_{fa}와 동상으로 제어함으로써 실현되며 본 실험에서는 회전자 위치를 검출하여 유기기전력의 위상으로 간주하고 이것으로부터 인버터 출력전류의 기준값을 발생하여 히스테리시스 전류제어를 수행하였다.

7. 실험결과

그림 7은 초전도 플라이휠과 Anglo contact bearing을 사용한 FES의 자연감속특성을 나타낸다. 초전도 베어링의 경우 볼베어링시스템과 비교하여 현저히 큰 감속현상이 나타남을 알 수 있다. 전자의 경우 약 10,000[rpm]에서 매우 안정한 회전특성을 얻을 수 있었으며 볼베어링을 사용한 시스템에서는 고속의 전동/회생 모드에서 출력전류를 유기기전력과 동상의 정현파 전류로 제어하는 동시에 7200[rpm]에서 100[V]/400[W]-25[sec]의 직류전력을 회생하였다.

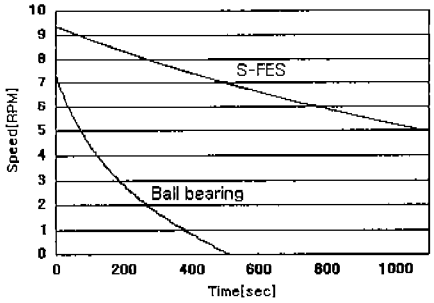

그림 7 자연감속특성

8. 결론

플라이휠 에너지 저장시스템 설계요소에 관해 검토하고 초전도 베어링과 볼 베어링을 장착한 FES를 제작 실험하였다. 실험에서 초전도 베어링의 경우는 9,000[rpm]에서 약 60[W]정도의 손실을 일으켜 볼 베어링과 비교하여 효율이 매우 높고 저소음 특성을 나타냈다.

기계적 안정성을 고려하여 가속시키지 못하였으나 차후 휠 정격속도에서 운전하여 전동/발전기, 전력변환장치의 동작 및 효율에 대해 연구할 계획이다.

참고문헌

[1] Richard F. Post, et. al., "A High-Efficiency Electromechanical Battery," *Proc. of IEEE*, vol. 81, no. 3, pp. 462-474, 1993.

[2] Shirou Nakamura, "Flywheel Technologies and High Tc Superconductivity," *ISTEC Journal*, vol. 6, no. 1, pp. 43-50, 1993.

[3] S. Zannella, et. al., "High-Tc Superconducting Magnetic Bearings for Rotation- Based Devices," *IL NUOVO CIMENTO*, vol. 16D, no. 12, Dec., 1994.

[4] Hidekazu Teshima, "Ring-shaped Flywheel Energy Storage Systems with Superconducting Levitation," in Proc. of *PCC-Nagaoka '97*, pp. 701-706.

[5] Hull, J, et al., "Rebolutionary Bearing Creates Efficient Energy Storage Device," *Logos*, vol. 12, no. 1, 1994.