

초전도 플라이휠 에너지 저장장치의 회전 성능 테스트

이정필, 정세용, 한영희, 성태현
한전 전력연구원

A Rotational Performance Test for Superconductor Flywheel Energy Storage System

J. P. Lee, S. Y. Jung, Y. H. Han, T. H. Sung
KEPRI

Abstract - 본 논문에서는 5 kWh급 초전도 플라이휠 에너지 저장장치(Superconductor Flywheel Energy Storage System : SFES)를 제작하고 시험운전을 통하여 회전 테스트를 수행하였다. 본 연구에서 사용된 초전도 베어링은 저널형 베어링으로써 액체 질소를 순환시켜 초전도체를 냉각시키고 휠을 부양시켜서 전동발전기를 통하여 회전시키게 된다. 액체 질소를 순환하였을 경우 초전도 베어링의 냉각특성을 고찰하였고, 전동 발전기를 이용하여 2000[rpm]까지의 회전 테스트가 수행 되었으며, 전동발전기의 동작 특성 및 회전시 휠의 제적과 축진동 특성을 테스트 하였다.

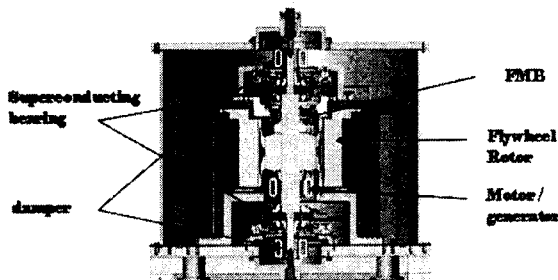
1. 서 론

초전도 플라이휠 에너지 저장장치는 전기 에너지를 회전 운동 에너지로 저장하였다가 필요시 다시 전기 에너지로 변환하여 사용가능한 에너지 저장장치이다. 고온초전도 베어링을 이용한 플라이휠 에너지 저장장치는 고온 초전도체의 독특한 현상인 자기 공중부양력 및 자기 고정력을 이용한 베어링을 사용하기 때문에 기계적인 베어링과는 달리 마찰로 인한 손실이 거의 없이 저장효율이 매우 높으며 에너지 저장밀도가 높다는 장점이 있다. 전기 수요는 수요의 특성상 주간과 야간의 차이가 평균적으로 약 30% 정도 되며, 냉방설비의 이용이 증가하는 여름철에는 더욱 큰 차이를 나타내는데, 이를 모두 수용하는 발전용량을 확보하는 것은 경제적으로 낭비이며, 설비의 증대에도 어려움이 있다. 플라이휠 에너지 저장 장치는 이와 같은 비 효율적인 에너지 생산 소비 체계를 대체할 수 있도록 심야의 잉여 전력을 저장하였다가 첨두부하시 예비 발전 전력원으로 사용가능하며 또한 무정전 전원 장치와 같은 비상전원 등으로 사용가능한 환경친화적인 설비이다. 본 논문에서는 저널형(journal type) 초전도 베어링을 채용한 5 kWh급 초전도 플라이휠 에너지 저장장치를 제작하고 시험운전으로 2000[rpm] 정도의 저속영역에서 회전 테스트를 수행하였으며 그 결과를 나타내었다.

2. 본 론

2.1 초전도 플라이휠 에너지 저장장치

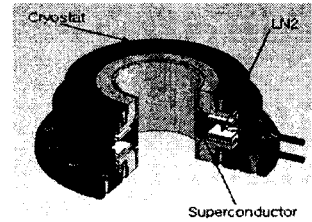
그림 1은 제작된 5 kWh급 초전도 플라이휠 에너지 저장장치의 조립도를 나타낸다. 초전도 베어링의 고정자는 YBCO 벌크 초전도체이며 휠의 상부 및 하부에 각각 설치되어 있다. 이는 회전자가 되는 휠의 영구자석 부분을 감싸고 있는 저널 베어링 형태이다. 제조된 휠의 무게는 약 215kg에 달하며 이를 초전도 저널 베어링만을 이용하여 부양시키기에는 초전도 베어링의 부피가 너무 커지고 이에 따라 냉각 및 진공 유지비용이 증가하는 문제가 예상되어 Floating Magnetic Bearing(FMB)을 이용하여 플라이휠의 무게를 감당하고 초전도 베어링은 플라이휠의 안정적인 부양을 담당하도록 설계하였다. 이때 초전도 베어링은 액체 질소의 순환에 의해 냉각되며 플라이휠을 부양시키게 된다. 부양된 휠을 회전시키기 위하여 휠 아래쪽 부분에 회전축에 직교하는 방향으로 균일한 2극 자속 분포를 발생시키는 외전형 할바흐(outer rotor-type Halbach) 전동/발전기가 설치되었다. 이와 같은 모든 설비는 냉각손실과 회전손실을 최소화하기 위하여 진공 챔버속에 설치되었다.



<그림 1> 초전도 플라이휠 에너지 저장장치 조립도

2.2 초전도 베어링 고정자

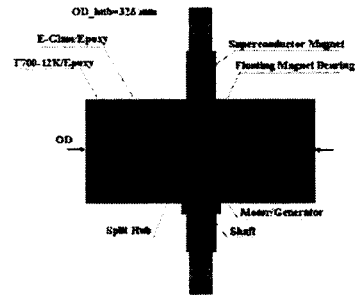
그림 2는 초전도 베어링의 고정자를 나타낸다. 초전도 베어링 고정자는 상부 및 하부에 각각 1개씩 설치되어 있으며 하나의 고정자에는 8개의 YBCO bulk 초전도체가 고정되어 있으며 액체 질소의 주입을 통하여 냉각되는 형태이다. 이 초전도체와 회전자의 영구자석간의 간격은 5mm를 기준으로 하여 설계 되었다.



<그림 2> 초전도 베어링 고정자

2.3 플라이휠 로터

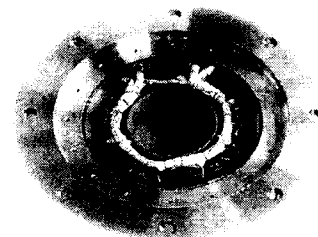
5 kWh급 휠에는 복합재 휠 및 hub 외에도 초전도 베어링용 마그넷 링 세트, floating magnet, motor 회전체 등이 추가로 부착되어야 하므로, 여러 가지 조립 방법이 시도되었고, 운전속도 10,000~20,000 rpm에서 저장용량이 5 kWh가 되는 조건 하에서 질량이 최소가 되는 최적의 설계를 도출하였다. 그림 3은 설계된 플라이휠 로터를 나타낸다.



<그림 3> 플라이휠 로터

2.4 전동 발전 시스템

전동 발전기는 회전체인 플라이휠을 구동하여 입력되는 전기에너지를 회전에너지로 저장하였다가 필요시 전기에너지로 변환하여 출력할 수 있는 에너지 변환 장치로 에너지 저장장치에 필수적인 부분이다. 본 시스템에서는 영구자석 회전기에서 발생하는 코깅토크 리플과 슬롯리플에 의한 고조파 손실을 최소화한 슬롯리스 Ring-wound형의 영구자석 동기기를 선정하였다. 그림 4는 시스템에 부착된 전동발전기를 나타낸다. 영구 자석형 동기 전동기 구동을 위해서는 영구자석 회전자의 정확한 위치를 알아내는 것이 필요한데 본 시스템에서는 Hall 센서를 채용하여 위치를 검출하였다.



<그림 4> 시스템에 부착된 전동 발전기 고정자 모습

2.5 실험방법

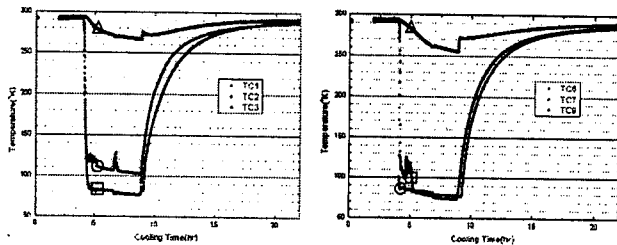
제작된 5 kWh급 초전도 플라이휠 에너지 저장장치의 회전테스트는 다음과 같은 과정으로 수행되었다.

- ① 진공챔버의 내부 압력을 10^{-3} [torr]이하로 유지 한다.
- ② 하부 및 상부 피복을 이용하여 휠을 펠드쿨링(field cooling) 위치로 들어 올리고 휠의 센터를 조절한다.
- ③ 초전도 베어링 cyostat에 액체질소를 주입하여 초전도체를 냉각 시킨다.
- ④ 초전도 베어링의 온도가 80K 이하로 내려가면 고정되어 있던 하부 및 상부 피복을 떼어내고 휠을 부양시킨다.
- ⑤ 휠이 부양되고 나면 전동 발전기를 구동시켜 휠을 회전시켜 2000[rpm]을 유지하도록 한다.
- ⑥ 전동 발전기의 스위치를 끄고 회전을 유지 시킨다.

2.6 회전 테스트 결과

2.6.1 초전도 베어링 냉각

전체 시스템 조립 후 시스템에 대한 냉각을 실시하였다. 냉각이 순환펌프 작동 후 온도는 급격히 떨어지기 시작하여 약 30분 후 액체질소 탱크의 온도로 추정되는 80 °K에 도달하며, 과냉 상태를 위하여 헬륨 냉동기를 가동하면 천천히 과냉각이 이루어진다. 그림 5(a)에 하부 베어링의 밑부분(TC1)과 윗부분(TC2), 단열 후단부(TC3)의 온도를 표시하였는데, 액체질소가 정체를 이루는 부분인 TC1의 온도는 냉동기 작동 전에 약 83 °K 까지 하강하는 것을 알 수 있으며, 액체질소가 직접 접촉하지 않는 TC2의 온도도 ~110 °K 까지 하강하는 것을 알 수 있다. 단열 후단부인 TC3의 온도도 약간의 하강하여 20 °K 정도의 온도차이가 발생함을 알 수 있는데, 열 손실 저감을 위하여 단열 방법을 더 개선하여야 함을 알 수 있다. 그림 5(b)의 상부 베어링에서도 같은 경향을 보여 TC6, TC7의 온도는 80 °K 이하로 과냉각되며, TC9는 약 260 °K 까지 냉각되고 있음을 알 수 있다. 냉각 순환펌프를 정지시킨 이후 온도는 초기에 급격히 상승하고 이후 완만한 상승곡선을 보인다.



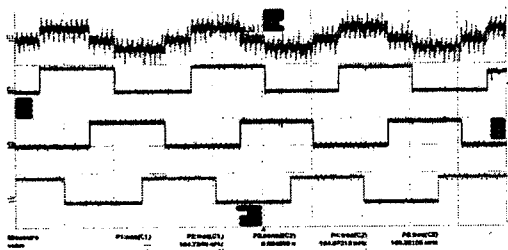
(a) 하부 베어링 (b) 상부 베어링
<그림 5> 초전도 베어링 냉각 과정

2.6.2 회전체 부양

회전체는 상하부의 피복으로 고정된 상태에서 FMB 간격을 조정할 수 있도록 설치되었으며, 냉각 실시 전에 최적의 냉각 위치를 찾기 위한 실험 결과 FMB 인력이 회전체 무게와 동가가 되는 순간의 간격에서 0.2 mm 낮은 점이 최적으로 설정되었다. 이 위치에 회전체를 고정시키고 냉각을 실시하였다. 냉각 온도 기준은 회수되는 액체질소의 온도가 80 °K 이하인 경우로 설정하였다. 이때 초전도 베어링 온도의 최저 값은 대략 75 °K 정도이었다. 충분한 과냉이 이루어진 후 상하의 피복을 제거하면서 회전체 높이의 변화를 관찰한 결과 회전체의 무게로 인해서 평균적으로 약 0.2 mm 하강하는 것으로 파악되었다.

2.6.3 전동발전기를 이용한 회전 테스트

회전자 영구자석 위치를 홀센서 보드를 사용하여 검출하였기 때문에 Flywheel 초기구동은 BLDC 모드로 시작하였다. 그림 6은 초기 구동 시 여자되는 상전류와 120°의 위상차를 가지는 3개의 홀센서 신호를 나타내고 있다.

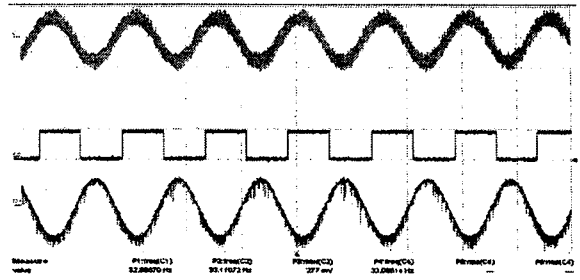


<그림 6> 초기 BLDC 구동 시 상전류(C1)와 홀센서 신호(C2, C3, C4)

초기 구동후 제어의 효율성과 안정성을 위하여 Flywheel 구동은 일정 전류 가속모드로 Motoring 동작을 한다. Motoring 모드에서는 계통으로부터 전력을 공급받아서 전동발전기가 전동운전을 수행한다. 초기 BLDC 모드로 시스템이 안전적으로 starting을 하여 홀센서 신호로부터 sine값이 계산되면 벡터운전으로 운전방식이 변환된다.

벡터운전 영역에서는 토크분 전류(Iq)의 값을 일정하게 유지하여 일정전류 가속모드로 운전을 하게 된다. 그림 7은 이와 같은 가속을 하여 전동기가 2,000[rpm]에 도달 했을 때의 파형을 나타내고 있다.

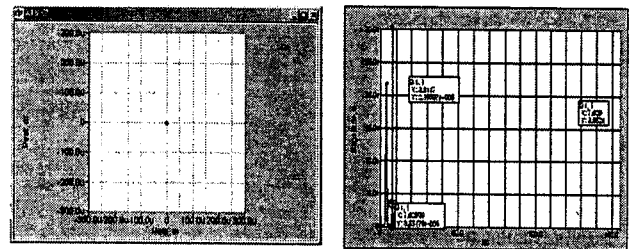
전류는 구형파에서 sine파 형태로 바뀌었고, 벡터제어에 필요한 sine-wave가 홀센서 신호로부터 변환되어 출력됨을 확인할 수 있다.



Ch1: 상전류(10A/div) Ch2: 홀센서 신호 Ch3: sine파
<그림 7> 벡터 제어로 전환 후

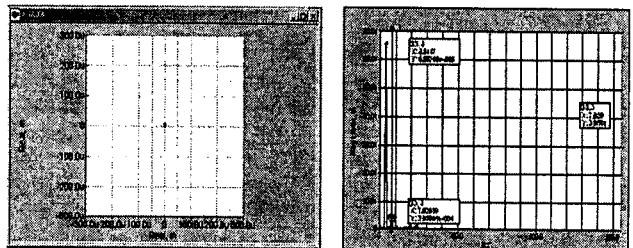
2.6.4 회전테스트

부양 완료 후 뎀퍼를 가동하고 회전 시험을 실시하였다. 그림 8은 2000 [rpm] 이하에서 회전시켰을 때의 상하부 축의 진동을 나타내는 orbit을 나타낸 것이다.



(a) 상부 orbit

(b)상부 축 진동 FFT



(c)하부 orbit

(d) 하부 축 진동 FFT

<그림 8> 회전 테스트 결과

3. 결 론

본 연구에서는 5 kWh급 초전도 플라이휠 에너지 저장장치를 제작하고 그 첫 번째 테스트로 2000[rpm]까지의 회전테스트가 수행되었다. 액체질소 순환 후 온도 특성이 테스트 되었고, 전동 발전기를 이용하여 회전 시켰을 경우의 전동발전기 동작 특성 및 회전체 축 궤적과 축진동 특성을 해석하였다. 주요한 결과는 다음과 같다.

- 1) 초전도 베어링 냉각시 냉각성능이 우수하여 냉각이 잘 되었으나 초전도 베어링과 닿고 있는 단열 후단부의 온도 또한 하강하는 것으로 보여 열 손실 저감을 위한 방법을 개선해야 함을 알 수 있었다.
- 2) 충분한 냉각을 통하여 회전체의 부양은 충분히 이루어 졌다.
- 3) 회전 테스트 결과 상하부의 궤적과 축진동 특성이 매우 우수하게 나타났다.

이 연구 결과와 함께 계속해서 5 kWh의 출력을 낼 수 있는 정격속도인 20,000[rpm]까지의 고속 회전테스트를 수행할 것이며, 또한 회전손실 및 에너지 저장 효율에 대한 테스트가 수행 될 것이다.

[참 고 문 헌]

- [1] 성태현, 한상철, 한영희, 정년호, 오제명, 이경필, 정세용, "5 kWh 급 초전도 플라이휠 에너지 저장기술 개발", 전력산업연구개발사업 최종 보고서, 2005
- [2] 최태식, 서문석, 서인영, 류동완, 성태현, "초전도 플라이휠 에너지 저장장치용 전동 발전 시스템 개발", 대한전기학회 전기기기 및 에너지 변환 시스템 부문의 추계학술대회 논문집, 2004