

초전도 플라이휠 에너지 저장장치의 손실 평가

이정필*, 한영희*, 정세웅*, 한상철*, 정년호*, 성태현*, 유대준**, 장석명**
*한전 전력연구원, **충남대학교

Loss Evaluation of Superconductor Flywheel Energy Storage System

J. P. Lee*, Y. H. Han*, S. Y. Jung*, S. C. Han*, N. H. Jeong*, T. H. Sung*, D. J. You**, S. M. Jang**
*Korea Electric Power Research Institute, **Chung-Nam National University

Abstract - 본 논문에서는 초전도 플라이휠 에너지 저장장치에 저장된 에너지의 손실을 평가하였다. 초전도 베어링은 저어널 타입이며 수직축 형태로 플라이휠 시스템을 구성하였다. 초전도 플라이휠에 사용하는 전동발전기의 회전자를 영구자석을 사용하는 경우 코어의 사이즈 및 체적 변화에 따른 회전 손실과 진공에 따른 풍손이 회전손실에 미치는 영향을 평가 하였다.

1. 서 론

에너지 저장장치는 전력수요에 유연하게 대처 가능하게 함은 물론 전기 품질을 향상시킬 수 있는 효율적인 수단으로써 많은 연구가 진행되어 왔다. 플라이휠 에너지 저장장치는 주로 무정전전원장치(Uninterruptible Power Supply), 전력품질 개선용 및 변동하는 부하에 대한 부하 평준화용으로 사용가능하다. 그러나 종래의 기계식 플라이휠 및 전자식 플라이휠은 기계적 마찰이 상당히 크거나 외부에서 계속적으로 전원이 공급되어야 하므로 에너지의 장기 저장이 불가능하므로 주로 무정전전원장치나 전력품질 개선용으로 사용하는 예가 많다. 그 중에서 초전도 플라이휠 에너지 저장장치는 매우 적은 손실로 에너지의 장기 저장이 가능하며 잉여전력을 효율적으로 사용하여 전력수요에 유연하게 대처가능하여 전기 에너지 이용을 극대화 할 수 있다.

초전도 플라이휠 에너지 저장장치는 에너지를 저장하는 플라이휠, 마찰 없이 휠을 부양시키는 초전도 베어링, 그리고 에너지를 저장하고 사용할 수 있도록 하는 에너지 변환을 담당하는 전동 발전기로 구성된다.

그러나 초전도 플라이휠 에너지 저장장치에는 풍손, 초전도 베어링, 및 영구자석을 사용하는 전동발전기 등에서 회전손실이 발생한다. 풍손은 플라이휠 챔버 내부의 진공도가 0.4mtorr 이하에서는 거의 발생하지 않으며[1] 초전도 베어링에 의한 회전손실은 여러 연구결과로 볼 때 매우 적은 양이라 할 수 있다. 그러나 영구자석을 사용하는 전동발전기를 통하여 발생하는 손실은 초전도 플라이휠 에너지 저장장치를 구성하는 부분 중에서 가장 크다. 따라서 회전손실이 발생하지 않도록 영구자석을 사용하지 않는 리럭턴스(Reluctance) 전동 발전기 혹은 호모폴라(Homo Polar) 타입의 전동발전기를 사용하는 방안도 있으나 전동효율개선, 발전효율의 개선 등이 필요하며 또한 그 구조를 플라이휠에 적용시키기가 매우 힘들다.

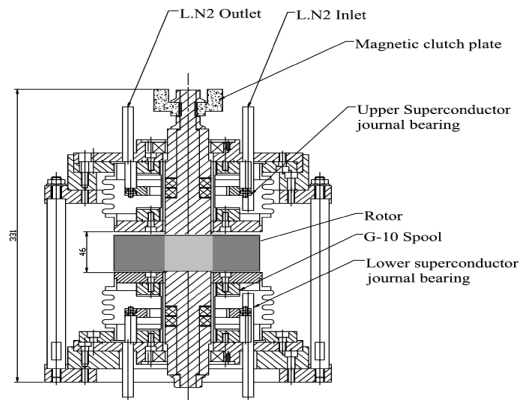
지금까지 여러 문헌[2][3]에서 초전도 베어링에서 발생하는 회전손실에 대한 평가와 회전손실을 줄이기 위한 다양한 연구가 진행되어 왔다. 그러나 초전도 플라이휠에 사용되어 지는 영구자석형 전동 발전기에서 발생하는 회전손실에 대한 정량적인 평가와 이를 줄이기 위한 연구는 거의 진행된바가 없다. 따라서 본 연구에서는 영구자석형 전동발전기를 사용하는 초전도 플라이휠의 저장된 에너지 손실과 풍손이 에너지 손실에 미치는 영향을 평가 하였다.

2. 본 론

2.1 초전도 플라이휠 에너지 저장장치

그림 1은 본 실험에 사용된 초전도 플라이휠 에너지 저장장치의 구조를 나타내고 있다. 에너지 저장장치는 복합체로 구성된 플라이휠과 상부 및 하부에 각각 1개씩의 초전도 베어링으로 구성되어 있으며 상부에는 유도 전동기를 이용하여 회전시킬 수 있도록 알루미늄 플레이트로 구성되어 있는 것을 볼 수 있다. 그림에서 알 수 있듯이 초전도 베어링은 저어널 형태(journal type)의 베어링이며 축을 수직으로 세워서 회전하는 형태인 수직축형 초전도 플라이휠 에너지 저장장치이다. 초전도 베어링은 초전도체로 구성된 부분과 영구자석으로 구성되는데 영구자석 부분은 축 방향으로 자화된 두 개의 자석 사이에 링 모양의 철을 삽입한 구조로 되어 있다. 여기서 영구자석은 서로 같은 극끼리 마주 보게 하여 반경방향으로 자속이 분포되도록 하였다. 이때 사용된 영구자석의

내경은 20mm이며 외경은 40mm이며 두께는 10mm인 것을 사용하였다. 초전도 베어링에 사용된 초전도체는 35×25×10[mm] 크기의 YBCO 벌크 초전도체 6개로 구성하였다. 에너지가 저장되는 부분인 플라이휠은 알루미늄으로 구성된 축과 복합체 휠로 구성되어 있으며 축의 길이는 300mm이며 축의 직경은 40mm이며 휠 전체의 무게는 전부 4kg이다. 이와 같이 구성된 초전도 플라이휠은 공기에 마찰 의한 풍손을 없애기 위하여 챔버 내부에 삽입하여 진공을 유지할 수 있는 구조로 구성하였다.



〈그림 1〉 초전도 플라이휠 에너지 저장장치

2.2 초전도 플라이휠 에너지 저장장치의 에너지 손실

초전도 플라이휠 에너지 저장장치는 UPS, 전력품질 개선용 및 부하 평준화를 위한 장기 에너지 저장 등 여러 가지 용도로 사용될 수 있다. 에너지 저장장치가 UPS 및 전력 품질 개선용으로 사용될 경우 그 목적을 달성하기 위해서 약간의 에너지의 손실은 그다지 문제가 되지 않는다. 그러나 부하 평준화와 같이 에너지의 효율적 이용의 목적을 달성하기 위해 장기간의 에너지를 저장하는 경우에는 저장된 에너지가 시간이 지남에 따라 얼마만큼 손실되는가 하는 문제는 매우 중요하게 된다. 초전도를 이용한 플라이휠 에너지 저장장치를 사용하는 이유는 에너지 손실을 최대한 작게 하고 에너지 이용효율을 극대화 하는 것이 주 목적이기도 하다. 그러나 이러한 플라이휠 에너지 저장장치는 설계방법 및 제작 상황에 따라 다양한 손실이 존재하게 마련이다. 손실이 발생시키는 요인은 초전도체와 영구자석으로 구성된 초전도 베어링에서 발생하는 손실, 영구자석 전동발전기를 사용하는 경우 영구자석과 코어 사이에서 발생하는 손실 및 진공도에 따른 풍손 등에 의하여 다양한 손실이 발생한다.

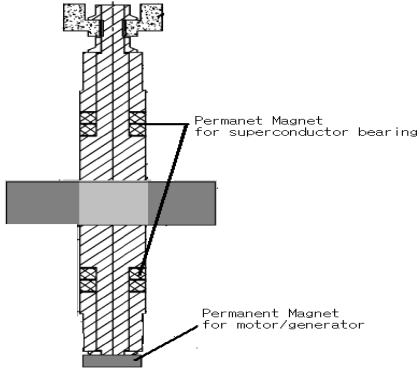
영구자석형 전동발전기를 플라이휠에 적용하기 위해서는 전동발전기의 회전자(rotor)가 되는 영구자석은 에너지가 저장되는 플라이휠 축에 삽입되고 고정자(stator)는 이 회전자를 둘러싸고 있다. 에너지를 저장하기 위해서 전동발전기는 전동기로 동작하여 회전자를 정격속도로 회전시켜 전원을 차단한다. 이 때 영구자석으로 구성된 회전자의 자속으로 인하여 플라이휠의 회전이 감소하면서 에너지 손실이 발생한다. 이때 발생하는 손실은 초전도 베어링에서 발생하는 손실보다 상당히 크며 이를 정확하게 평가하여 회전손실을 최소화 시켜야 한다.

2.3 실험 방법

영구자석형 전동 발전기를 사용하는 초전도 플라이휠 에너지 저장장치의 회전손실을 평가하기 위해 플라이휠 축 아래에 영구자석을 그림 1

과 같이 설치하였다. 사용되어진 영구자석은 NdFeB35 계열로써 반경방향으로 착자 되었으며 내반경 10mm, 외반경 20mm이며 두께는 10mm이며, 잔류 자속 밀도는 1.25[T]이다. 영구자석을 설치한 후 영구자석과 코어에 의해 발생하는 회전손실을 평가하기 위하여 두 가지 종류의 코어를 제작하였다. 내반경 40mm 외반경 52mm 두께 0.15mm 규소강판(Type A)을 두께 10mm로 적층한 것과 내반경 40mm 외반경 48mm 두께 0.15mm 규소 강판(Type B)을 10mm로 적층하여 제작하였다.

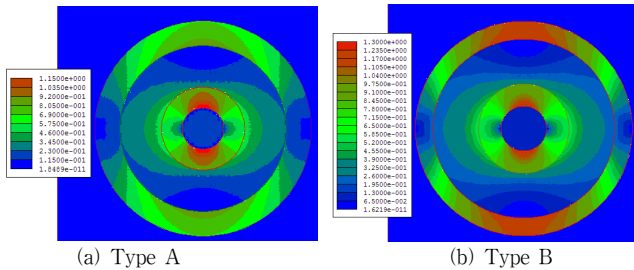
먼저 진공이 회전손실에 미치는 영향을 평가하기 위하여 영구자석 및 규소강판 코어를 제거 한 후 진공을 4E-4[torr]로 유지한 후 6100[RPM]의 속도로 회전시킨 후 회전손실을 측정하였다. 이는 초전도체가 회전손실에 미치는 영향을 평가할 수 있다. 이후 진공을 2.2E-2[torr]로 유지한 후 회전손실을 측정하여 진공이 회전손실에 미치는 영향을 평가하였다. 그리고 전동 발전기에 사용되는 코어의 체적이 회전손실에 미치는 영향을 평가하기 위해 각각의 코어를 삽입하여 회전손실을 측정하여 발생하는 량을 평가하였다. 이때 회전속도는 홀센서를 이용하여 계측하였다.



<그림 2> 영구자석이 설치된 휠 축

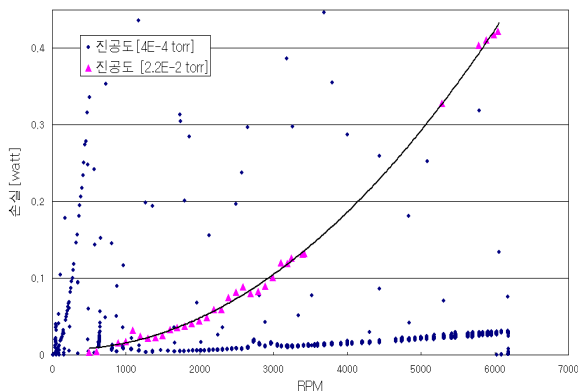
2.4 적층된 규소 강판 코어의 자계분포

그림 3은 전자장 해석 프로그램인 Maxwell을 이용하여 Type A와 Type B 코어에 대한 자계분포를 해석한 결과를 나타내고 있다. Type A의 경우 최대 자속밀도는 1.02[T]이며 Type B의 경우 최대 자속 밀도는 1.24[T]이다.



<그림 3> 코어의 자계분포

2.5 회전 테스트 결과

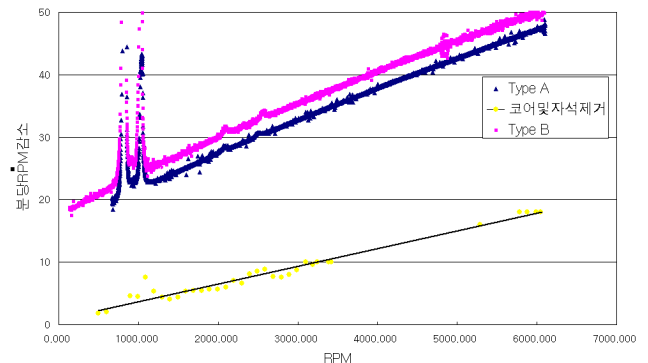


<그림 4> 진공도에 따른 회전손실

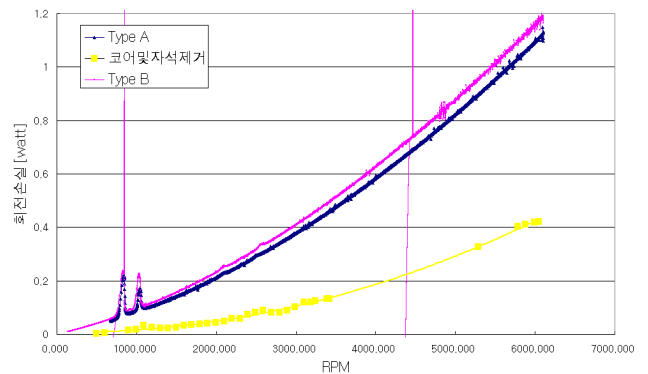
그림 4는 휠 축 아래쪽에 영구자석 및 코어를 삽입하지 않은 상태에서 진공도가 4E-4[torr]인 경우와 진공도가 2.2E-2[torr]인 경우에 대한 회전손실을 측정된 결과를 나타내고 있다. 그림에서 진공도가 4E-4[torr]인 경우는 풍손에 의한 손실을 무시할 수 있으므로 발생하는 손실은 초전도 베어링에 의한 손실을 나타낸다. 따라서 그림에서 알 수 있듯이 초전도 베어링에서 발생하는 손실은 0.025[W]이며, 공기 마찰에 의한 풍손은 약 0.4[W] 발생 하였다.

그림 5는 Type A 코어와 Type B코어를 각각 사용한 경우 6100[RPM]부터 분당 RPM감소량을 측정된 결과를 나타내고 있다. 이때 각각의 경우 진공도는 2.2E-2[torr]로 일정하게 유지하여 측정하였다. 그림에서 6100[RPM]에서 Type A의 코어를 사용하였을 경우 회전손실은 풍손을 빼고 나면 분당 34 [RPM]의 손실을 가지며, Type B의 코어를 사용하였을 경우 회전손실은 분당 28[RPM]의 손실이 나타남을 알 수 있다.

그림 6은 각 코어 타입에 따른 분당 회전 손실량 계산하여 나타내었다. 6100 [RPM]에서 Type A는 1.2[W]의 손실을 나타내었고 Type B의 손실량은 1.1[W]로 나타났다. 따라서 코어의 반경, 코어내부 자속분포 및 코어 체적의 관계를 이용하여 초전도 플라이휠의 회전손실을 줄일 수 있음을 확인 하였다.



<그림 5> 코어 타입에 따른 분당 RPM감소



<그림 6> 코어 타입에 따른 회전 손실량

3. 결 론

본 논문에서는 초전도 플라이휠 에너지 저장장치의 전기에너지 손실 량을 정량적으로 고찰하였다. 진공 조건에 의한 풍손, 초전도 베어링에서 발생하는 손실을 평가 하였다. 또한 영구자석형 전동발전기가 설치되는 경우 발생하는 손실을 코어 타입에 따라 평가 하였다. 이는 장기간의 에너지 저장을 목적으로 하는 플라이휠 에너지 저장장치의 손실을 최소화하기 위한 중요한 결과로서 활용될 수 있다.

[참 고 문 헌]

[1] Y. H. Han, J. R. Hull, S. C. Han, N. H. Jeong, T. H. Sung and K. S. No, "Design and characteristics of a superconductor bearing", IEEE Tans. On Applied Superconductivity, Vol. 15, No. 2, 2005
 [2] J. Demachi and K. Matsunaga, " Numerical and experimental evaluation of rotation speed degradation of superconducting magnetic bearing", Physica C 412-414, 789-794, 2004
 [3] R. Shiraishi, K. Dmachi, M. uesaka and R. Takahata, "Numerical and experimental analysis of the rotation speed degradation of superconducting magnetic bearings", IEEE Trans. on Applied Superconductivity, Vol. 13. No. 2, 2003