

초전도 플라이휠 에너지 저장장치용 전동 발전기의 에너지 저장 효율 영향 평가

이정필*, 한영희* 정세용* 박병준* 박병철* 성태현*
한전 전력연구원*

Assessment on Energy storage efficiency effects of motor/generator for SFES

Jeong-Phil Lee*, Young-Hee Han* Se-Yong Jung* Byung-Jun Park,* Byeong-Cheol Park, Tae-Hyun Sung*
Korea Electric Power Research Institute*

Abstract - 본 논문에서는 초전도 플라이휠 에너지 저장장치(Superconductor Flywheel Energy Storage System : SFES)의 에너지 변환을 위해 사용된 영구 자석형 전동 발전기(Permanent Magnet Synchronous Motor/Generator : PMSM/G)가 SFES의 에너지 저장효율에 미치는 영향을 평가 하였다. SFES 시스템은 YBCO 벌크 초전도체를 이용한 저어널 타입(journal type)의 초전도 베어링을 사용하였으며, 슬롯리스 형 PMSM/G를 사용하였다. PMSM/G의 고정자 코어, 누설 자속 및 감겨진 코일에 의한 저장 에너지 손실을 측정하였다. 사용된 코어의 크기, 누설자속, 및 코일의 적절한 선정을 통하여 저장된 에너지의 손실을 상당히 줄일 수 있음을 확인하였다. 또한 영구자석과 코어가 동시에 회전하는 회전 코어형 전동발전기를 적용하여 에너지 손실을 매우 감소시킬 수 있음을 확인하였다.

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 무정전 전원장치(Uninterruptible Power Supply : UPS), 전력품질 개선용, 태양광 및 풍력과 같은 신재생 에너지의 저장 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 SFES는 매우 적은 손실로 에너지의 장기 저장이 가능하여 잉여전력의 효율적 사용을 통하여 전력수요에 유연하게 대처가능하기 때문에 전기 에너지 이용을 극대화 할 수 있다. 그러나 SFES 시스템의 구성 방법에 따라서 에너지의 저장 효율에 많은 차이가 발생할 수 있다. SFES 에는 공기 마찰에 의한 풍손, 초전도 베어링 및 영구자석을 사용하는 전동 발전기 등에 의해서 저장된 에너지의 손실이 발생한다.

지금까지 여러 연구를 통하여 공기저항에 의한 풍손은 플라이휠 챔버 내부의 진공도가 0.4mtorr 이하에서는 거의 발생하지 않으며[1], 초전도 베어링에 의한 에너지의 손실은 매우 적은 량까지 감소시킬 수가 있음을 알 수 있다[2][3]. 그러나 영구자석을 사용하는 전동 발전기를 통하여 발생하는 손실은 SFES를 구성하는 부분 중에서 가장 크지만 PMSM/G에 의한 SFES의 에너지 손실에 기여하는 정량적인 평가와 이를 줄이기 위한 연구는 거의 진행된바가 없다. 따라서 본 연구에서는 SFES에 사용된 PMSM/G가 SFES의 에너지 손실에 미치는 영향을 평가 하고 손실을 최소화 할 수 있는 방법을 제시하였다. PMSM/G의 고정자 코어는 슬롯을 가지는 타입과 슬롯리스 타입으로 구성할 수 있다. 슬롯을 가지는 타입은 코일에 의한 손실이 많이 발생하지 않지만 고정자 코어에 의한 손실이 슬롯리스 형태보다 상당히 크기 때문에 본 연구에서는 슬롯리스 형태의 PMSM/G를 채용하였으며 에너지 손실 특성을 평가 하였다. 슬롯리스 형태의 PMSM/G는 코어 사이즈, 누설자속 및 코일의 두께에 따라 에너지 손실에 많은 영향을 미치기 때문에 각각의 경우에 대하여 에너지 손실을 평가 하였다. 슬롯리스 타입의 PMSM/G의 경우 코어의 크기, 누설자속량, 및 코일의 적절한 선정을 통하여 SFES의 에너지 손실을 상당히 줄일 수 있음을 확인하였다. 또한 고정자 코어에 의해 발생하는 에너지 손실을 줄이기 위하여 영구자석과 코어가 동시에 회전하는 회전코어형 PMSM/G를 적용하고 그때 발생하는 손실을 분석 하였으며 기존 타입의 PMSM/G보다 에너지 손실을 현저히 감소시킬 수 있음을 확인하였다.

2. 본 론

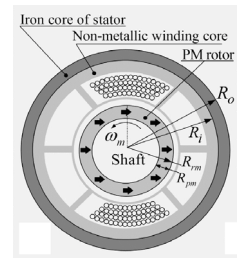
2.1 SFES의 구성

SFES는 에너지를 저장하는 플라이휠, 마찰 없이 휠을 부양시키는

초전도 베어링, 그리고 에너지를 저장하고 사용할 수 있도록 하는 에너지 변환을 담당하는 전동 발전기로 구성된다. 그림 1은 본 실험에 사용된 SFES의 구조를 나타내고 있다. 에너지 저장장치는 복합체로 구성된 플라이휠과 상부 및 하부에 각각 1개씩의 2개의 초전도 베어링으로 구성되어 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. 또한 1개의 초전도 베어링에 사용된 초전도체는 35×25×10[mm] 크기의 YBCO 벌크 초전도체 6개로 구성하였다. 에너지가 저장되는 부분인 플라이휠은 티타늄으로 구성된 축과 복합재 휠로 구성되어 있으며 축의 길이는 500mm이며 축의 직경은 40mm이며, 복합재 휠의 직경은 120[mm], 휠 전체의 무게는 전부 4kg이다. 이와 같이 구성된 초전도 플라이휠은 공기 마찰에 의한 풍손을 없애기 위하여 챔버 내부에 삽입하여 진공을 유지할 수 있는 구조로 구성하였다.



<그림 1> 초전도 플라이휠 에너지 저장장치

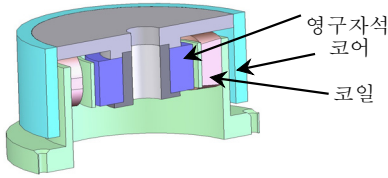


<그림 2> 슬롯리스 타입의 전동 발전기

2.2 PMSM/G의 구조

2.2.1 기존 타입의 PMSM/G

PMSM/G는 그림 1과 같이 SFES의 아랫 부분에 설치 되어 있으며, 이 PMSM/G는 실험을 위하여 착탈 가능한 구조로 되어 있다. 기존 타입의 PMSM/G는 그림 2와 같이 고정자 코어에 코일이 설치 되어 있으며 그 내부에서 영구자석이 회전하는 형태로 구성된다. 일반적으로 PMSM/G의 고정자 코어는 슬롯타입과 슬롯리스 타입의 구조로 나눌 수 있다. 슬롯형 구조는 구리 코일이 슬롯 내부에 들어가 있기 때문에 투자율이 낮기 때문에 영구자석에서 발생한 자속이 일부 누설을 제외하고는 투자율이 높은 치(teeth)쪽으로 발생하게 된다. 따라서 이러한 구조는 구리 코일에 의한 손실은 그다지 크지 않지만 코어의 치에 의해 발생하는 손실이 상당히 크게 된다. 반면에 슬롯리스 형태의 경우 구리 코일이 영구자석에 의한 자속에 노출되어 있기 때문에 자석이 높은 속도로 회전함에 따라 구리 코일에는 상당히 큰 와전류(eddy current)가 발생하게 되어 이는 SFES에 저장된 에너지의 손실을 발생시키는 요인이 된다. 그러나 치가 없으므로 코어에 발생하는 손실은 상당히 줄어들게 된다. 슬롯형태 보다 슬롯리스 형태의 PMSM/G는 코어와 코일간의 손실이 발생하지만 코일에 의해 생기는 손실을 줄일 수 있으면 SFES에 적용하기가 더욱 유리해 질 수 있다. 따라서 코어의 사이즈 변화 및 누설 자속에 의한 손실을 평가하기 위해 사용된 PMSM/G는 슬롯리스 형태의 구조로써 그림 2와 같다. 사용되어진 영구자석은 NdFeB35 계열로써 반경방향으로 착자 되었으며 내경 20mm, 외경 40mm이며 두께는 10mm이며, 잔류 자속 밀도는 1.25[T]이다. 고정자 코어는 0.1 [mm] 구소 강관을 10 [mm] 적층하여 구성하였다.



〈그림 3〉 회전 코어형 PMSM/G 단면도

2.2.2 회전 코어형 PMSM/G

회전 코어형 PMSM/G는 기존의 방식과는 달리 코어가 고정되어 있고 내부에 영구자석이 회전하는 형태가 아니라 영구자석과 코어가 동일한 속도로 동시에 회전하는 형태이다. 이때는 코어에 영구자석에 의한 자속변화가 발생하지 않으므로 코어에서 발생하는 손실을 없앨 수 있다. 그러나 코어와 영구자석간의 간격이 멀어지게 되면 약간의 누설 자속에 의해 주변 금속에 발생된 와류에 의한 손실이 발생할 수도 있다. 그림 3은 누설 자속에 의한 손실과 코일의 두께에 따른 손실을 평가하기 위해 사용된 회전 코어형 PMSM/G를 나타낸다. 사용되어진 영구자석은 NdFeB35 계열로써 반경방향으로 착자 되었으며 내경 20mm, 외경 40mm이며 두께는 20mm이며, 고정자 코어는 적층하지 않은 순철을 사용하였다.

2.3. 실험 방법

전동 발전기의 코어, 누설자속, 및 코일에 의해서 발생하는 에너지 손실을 평가하기 위해서는 전동 발전기가 없는 경우 SFES에서 발생하는 손실을 먼저 평가해야 한다. 따라서 초기에 진공도를 0.4mtorr 이하로 유지시킨 후 풍선을 제거 한 상태에서 액체 질소 이용하여 초전도체를 냉각시킨 후 휠을 부양시키고 휠을 회전시켜 에너지를 저장한 후 시간에 따른 에너지 손실량을 평가해야 한다. 이때 발생하는 에너지 손실은 초전도 베어링에 의해 발생하는 손실이다. 다음으로 코어 사이즈에 따른 손실과 누설 자속에 의한 손실을 평가하기 위하여 기존 타입 PMSM/G에서 코일을 제거하고 슬롯리스 코어만 부착한 상태에서 휠을 회전시키고 에너지를 저장한 후 시간에 따른 에너지 손실량을 평가 한다. 코어의 사이즈를 변경시킨 후 실험을 반복한다.

누설 자속에 의한 회전손실을 평가하기 위해 PMSM/G의 자석과 코어가 동시에 회전하도록 회전 코어형 설치하여 시간에 따른 손실을 측정하였다. 이때는 자석과 코어가 동시에 회전하므로 코어에 발생하는 손실은 없고, 단지 코어와 자석사이에서 누설되는 자속이 외부 금속에 와류를 발생시켜 손실을 발생 시킨다. 그 누설되는 량을 조절하여 시간에 따른 에너지 손실량을 측정하여 회전손실에 미치는 영향을 평가 한다.

다음으로 회전형 코어 PMSM/G를 이용하여 누설 자속에 의한 손실과 코일의 두께가 회전손실에 미치는 영향을 평가하였다.

2.4 결과 및 고찰

그림 4는 고정자 코어의 내경 30 [mm]이고 외경이 각각 42[mm], 50[mm], 62[mm]로 증가할 때 코어 내측에서의 tangential 자속밀도 성분과 normal 자속 밀도 성분의 계측을 나타내고 있다. 내경이 고정되어 있고 외경이 증가하게 되면 normal 성분은 변하지 않고 tangential 성분의 자속밀도가 점차적으로 감소함을 알 수 있다.

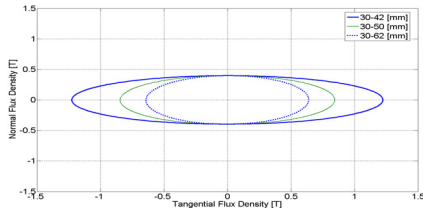
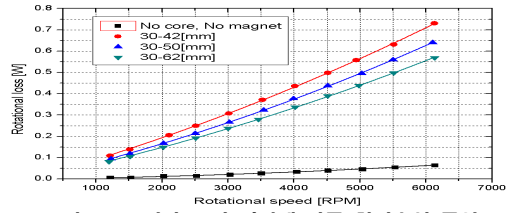
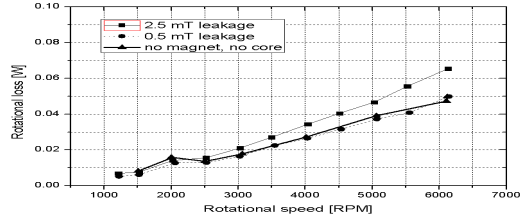


그림 4. 고정자 코어 변경에 따른 자속

그림 5는 코어의 외경이 증가함에 따라 tangential 성분의 감소로 인하여 에너지 손실이 감소하는 것을 보여주고 있다. 그러나 6000 [rpm]에서 자석과 코어가 없는 경우 초전도 베어링에 의한 손실은 0.05[W] 정도로 아주 적지만, 영구자석과 코어가 포함된 경우는 내경이 커질수록 손실이 감소하였지만 초전도 베어링에 의한 손실 보다 10배 이상 커짐을 알 수 있다. 그림 6은 영구자석과 고정자 아래쪽에 금속이 위치하고 있어 누설된 자속에 의해 에너지 손실에 미치는 영향을 나타내고 있다. 금속까지 누설되는 자속이 약 2.5 [mT]정도로 아주 적었지만 영구 자석과 코어가 없을 때 보다 약간의 손실이 더 발생하였다. 이를 차폐하여 금속까지의 누설자속이 0.5 [mT]정도로 감소시키게 되면 영구자석과 코어가 없을 때와 같이 거의 손실이 발생하지 않음을 알 수 있다. 따라서 PMSM/G를 사용하는 경우 코어와 자석과의 거리를 최소화 하여 누설 자속을 최소화 하거나, 주변에 도전성 금속을 제거하면 회전손실을 최소화 할 수 있다.



〈그림 6〉 고정자 코어 변경에 따른 회전손실 특성



〈그림 6〉 누설 자속에 의한 회전 손실

그림 7은 새로 제작한 회전코어형 PMSM/G를 사용하였을 경우, 코일이 없을 경우, 1 [mm]두께의 코일을 감았을 경우 및 0.3 [mm]두께의 코일을 감았을 경우에 대한 에너지 손실을 나타내고 있다. 6000 [RPM]에서 코일이 없는 경우의 손실은 약 0.14 [W] 정도로써 자석과 코어가 없는 경우 0.05[W]에 비해 약 3배 정도 발생하였다. 이는 코어와 자석사이의 공극이 넓어 누설자속이 외부 도전 금속에 유도된 와류에 의한 손실이다. 그리고 1 [mm] 코일을 감았을 경우에는 6000 [RPM]에서 0.62 [W]로 속도에 따른 에너지 손실이 급격하게 증가 하였고, 0.3 [mm] 코일을 감았을 경우에는 코일이 없는 경우보다 근사하게 높지만 큰 차이는 없음을 알 수 있다. 따라서 회전 코어형 PMSM/G를 사용하게 되면 기존 형태의 PMSM/G의 코어에서 발생하는 손실을 없앨 수 있고 단지 누설 자속에 의한 손실과 코일에 의한 손실만이 발생한다. 누설 자속에 의한 손실은 공극을 줄이거나 주변에 도전성 금속을 제거하면 낮출 수 있으며, 코일에서 발생하는 손실 또한 얇은 코일을 감음으로써 회전 손실을 현저히 줄일 수 있다.

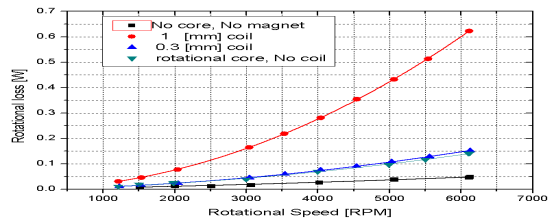


그림 7. 회전형 코어 PMSM/G의 코일 두께 및 누설에 의한 손실 특성

3. 결 론

본 논문에서는 SFES의 에너지 변환을 위해 사용된 PMSM/G가 SFES의 에너지 저장효율에 미치는 영향을 평가 하였다. 에너지 손실을 줄이기 위하여 회전코어형 PMSM/G를 설계하여 그 특성을 평가 하였다. 주요한 결과는 다음과 같다.

1. 기존 타입의 PMSM/G 코어의 외경을 증가할수록 normal 자속밀도는 변함이 없지만 tangential 자속밀도가 감소되면서 회전 손실이 감소하였다.
2. 코어의 내경이 커질수록 누설자속량이 증가하여 외부에 도전성 금속이 있으면 회전 손실에 영향을 미치므로 누설이 적게 발생 하도록 내경을 줄여야 하거나 또는 주변에 도전성 금속을 제거 하여야 한다.
3. 코일의 두께가 증가할수록 회전 손실은 급격하게 증가하였다.
4. 회전 코어형 PMSM/G의 사용을 통하여 얇은 코일의 사용과 영구 자석과 코어 사이의 공극을 줄이면 손실이 거의 없는 PMSM/G로써 사용이 가능하다.

[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