

플라이휠 에너지 저장 시스템용 양측식 영구자석 동기 전동/발전기의 착자 형태에 따른 특성 비교

장석명\*, **최지환\***, 유대준\*\*, 성소영\*\*\*, 한상철\*\*\*\*, 이정필\*\*\*\*  
 충남대학교\*, 충남청양도립대학\*\*, 한국해양연구원\*\*\*, 한전 전력연구원\*\*\*\*

Characteristic comparison of double-side PMSM/G according to magnetization pattern for flywheel energy storage system

Seok-Myeong Jang\*, Ji-hwan Choi\*, Dae-Joon You\*\*, Sang-Chul Han\*\*\*, Jeong-Phil Lee\*\*\*\*  
 Chungnam National University\*, Chungnam Cheongyang Provincial Collage\*\*, Korea Electric Power Research Institute\*\*\*\*

**Abstract** - This paper presents the double side PM synchronous motor/generator for core loss reduction in flywheel energy storage system. The use of double PM rotor causes the elimination of core loss in no-load state of machine. Because flywheel rotational speed is reduced by core loss, double PM rotor is very effective in flywheel system. This paper suggests two types of double side PM rotor, Halbach magnetized array and parallel magnetized array. And characteristic comparison according to thickness of rotor back core is performed.

1. 서 론

플라이휠 에너지 저장 장치는 전기에너지를 입력받아 전동 모드로 동작 플라이휠 회전에 기계에너지를 축적하며, 필요시 발전 모드로 동작, 축적된 기계에너지를 전기에너지로 전환 시킨다. 따라서 플라이휠 에너지 저장 장치는 전동(motoring) 모드, 아이들링(idling) 모드, 발전(generating) 모드의 세가지 동작 특성을 갖게 된다. 아이들링 모드는 전동과 발전 사이에 플라이휠 회전이 에너지의 입력력 없이 회전이 가지고 있는 기계에너지를 사용하여 일정기간 돌고 있는 상태로서 풍손 및 기계적 손실이 없다면 회전이 지속적으로 돌고 있는 상태를 의미한다. 일반적인 편측식 영구자석 전동발전기의 경우 이러한 아이들링 상태에서 영구자석에 의한 자계의 변화로 인해 고정자 코어에서 철손이 발생하게 되어 아이들링 상태에서 플라이휠 회전의 속도를 감소시키는 원인이 된다. [1]

본 논문은 아이들링 상태에서 발생하는 철손을 획기적으로 저감시키기 위해 플라이휠 시스템의 구동용 전동발전기로서 양측식 영구자석 동기 전동발전기를 제시하며, Halbach 착자와 평행방향 착자를 갖는 두가지 형태의 양측식 전동발전기에 대한 특성 비교를 수행한다. 양측식 영구자석 회전자 형태는 안쪽과 바깥쪽 회전자의 영구자석 사용에 의해 고정자 코어를 제거할 수 있게 되어, 철손 발생 대상을 원천적으로 제거하는 효과를 갖게 된다. 부하시 고정자 전류에 의한 자계로 인해 회전자 코어에서도 철손이 발생할 수 있지만, 그 양이 미미한 편이다.

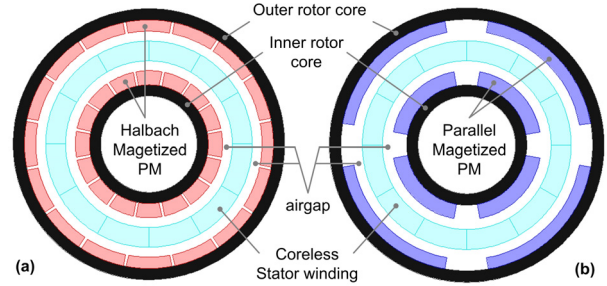
Halbach 착자는 자기차폐 특성을 가지고 있기 때문에 회전자 코어를 사용하지 않고도 유효한 자기회로를 구성할 수 있지만, 코어를 사용하게 되면 전동발전기의 에너지 밀도를 크게 향상시킬 수 있다.[2] 이에 반해 평행방향 착자의 경우 회전자 코어의 사용이 필수적이다. 본 논문은 회전자 코어의 두께에 따른 양측식 영구자석 전동발전기의 특성 해석을 수행하며, 양측식 전동발전기의 설계 기준을 제시한다.

2. 본 론

2.1 양측식 영구자석 동기 전동발전기의 구조

그림 1은 양측식 영구자석 동기 전동발전기의 구조를 나타내고 있으며, 그림 1 (a)는 Halbach 착자를 갖는 회전자 형태, 그림 1 (b)는 평행방향 착자를 갖는 회전자 형태를 보여주고 있다. 코어리스(coreless) 고정자 권선이 양측식 영구자석 회전자 사이에 위치하고 있으며, 3상 분포권 형태이고, 실제 제작 시 권선은 비자성체 구조물에 의해 지지되어진다. 제시된 두 가지 전동발전기의 영구자석을 제외한 기계적인 사양은 동일하며, 표 1은 전동발전기의 설계사양을, 표 2는 두 가지 자화 형태의 회전자에 대한 영구자석 사양 비교를 나타낸다. [3]에서는 Halbach 자화 배열에서 자석수를 극당 4개로 하였을 경우 매우 정현적인 유기기전력을 만들 수 있음을 제시하였으며, 본 논문은 이를 참고하여 극당 자석수를 선정하였다.

Halbach 착자 회전자의 경우 실제 제작 시 자석을 회전자 코어에 안정하게 고정시키기 위해 구조물을 사용하며, 구조물의 재질로써 부하시 고정자 전류에 의해 발생하는 회전자손이 영구자석에서 직접 발생하는 것을 막기위해 도전체를 사용하거나 비자성체를 사용한다.



〈그림 1〉 양측식 영구자석 동기 전동발전기 구조 : (a) Halbach 착자 (b) 평행방향 착자

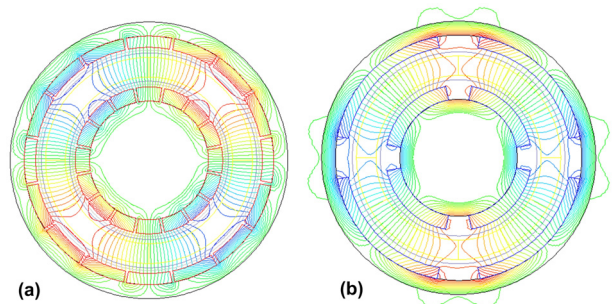
자석과 구조물과의 실제 제작성을 고려하여 Halbach 착자의 극호비를 0.93으로 선정하였으며, 반경방향 착자 회전자는 제작성 및 유기기전력의 정현성을 높이기 위해 극호비를 0.77로 선정하였다. 이와 같은 극호비의 차이에 의해 표 2에서 보여지는 바와 같이 자석 사용량에 있어서 차이를 보이는 것을 확인할 수 있다.

〈표 1〉 양측식 영구자석형 동기 전동발전기의 설계사양

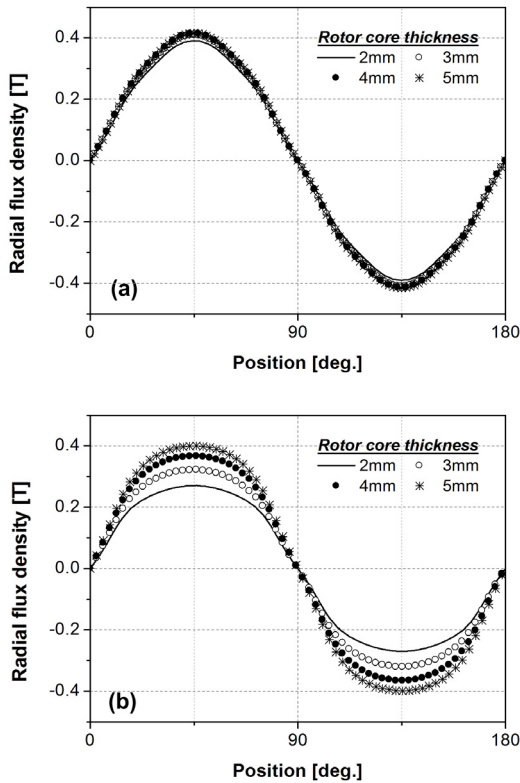
항 목	사 양	항 목	사 양
바깥쪽 회전자 코어 외반경	49 [mm]	안쪽 회전자 코어 외반경	21 [mm]
바깥쪽 회전자 코어 내반경	44 [mm]	안쪽 회전자 코어 내반경	16 [mm]
바깥쪽 영구자석 두께	4 [mm]	안쪽 영구자석 두께	5 [mm]
고정자 외반경	36.5 [mm]	고정자 내반경	29.5 [mm]
축방향 길이	102 [mm]	상당턴수	52 [turns]

〈표 2〉 영구자석 사양 비교

항 목	Halbach 착자	평행방향 착자
재질	NdFeB35	
극수	4	
극당 자석편수	4*2	1*2
극호비	0.93	0.77
자석 사용량	167622 [mm <sup>3</sup> ]	142310 [mm <sup>3</sup> ]



〈그림 2〉 영구자석에 의한 자속분포 특성 : (a) Halbach 착자 (b) 평행방향 착자



〈그림 3〉 회전자 코어 두께에 따른 반경방향 공극 자속밀도 특성 : (a) Halbach 착자 (b) 평행방향 착자

그림 2는 Halbach 착자와 평행방향 착자 영구자석 회전자에 의한 전동발전기의 자속분포 특성을 보여주고 있으며, 평행방향 착자의 자속 집중도가 Halbach 착자 보다 높음을 보여준다.

## 2.2 양축식 영구자석 전동발전기의 특성 비교

본 논문은 양축식 영구자석 전동발전기의 특성 해석을 위해 비선형 유한요소해석법을 사용하였으며, 상용 유한요소해석 프로그램인 Maxwell v14를 사용하여 해석을 수행하였다.

### 2.2.1 자속밀도 특성

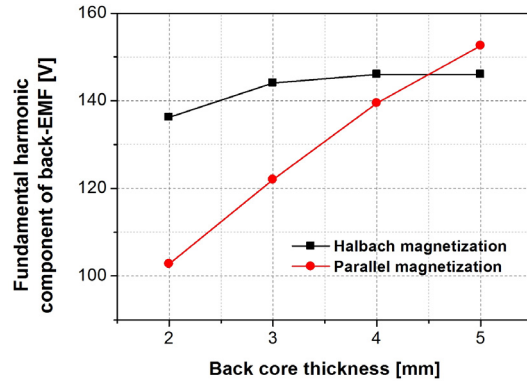
그림 3은 회전자 코어 두께에 따른 반경방향 공극 자속밀도 특성을 보여주고 있으며, 여기서 회전자 코어는 안쪽과 바깥쪽 회전자 코어를 통칭한다. 그림 3 (a)는 Halbach 착자에 대한 해석 결과로, 회전자 코어의 두께가 5[mm]에서 2[mm]로 줄어들어도 반경방향 공극 자속밀도의 크기가 거의 감소하지 않는 것을 확인할 수 있다. 이는 Halbach 착자 배열의 자기차폐 효과로 인해 영구자석에 의한 자료가 코어의 두께에 크게 영향 받지 않음을 알 수 있다. 그림 3 (b)는 평행방향 착자에 대한 해석결과로써, 코어의 두께가 감소함에 따라 자속밀도의 크기가 크게 감소하고 있음을 확인할 수 있다. 착자 형태에 따라 자속밀도의 모양이 달라 정량적인 비교는 힘들지만, 자속밀도의 최대값만을 고려하였을 때, 코어 두께 5[mm] 시에는 그 값이 거의 유사하고, 코어 두께 2[mm] 시에는 Halbach 착자의 자속밀도 값이 평행방향 착자의 값보다 1.5배 이상 큰 것을 볼 수 있다. 이와 같은 코어 두께에 따른 공극자속밀도의 변화는 코어에서의 자속밀도 포화현상과 밀접한 관계가 있으며, 코어에서의 포화현상이 자속밀도의 왜곡과 크기 감소를 가져오며, 역기전력 특성에도 직접적인 영향을 끼치게 된다.

### 2.2.1 역기전력 특성

표 3은 Halbach 착자와 평행방향 착자 전동발전기의 회전자 코어 두께에 따른 무부하 역기전력의 고조파별 성분값을 나타낸다. Halbach 착자는 미량의 3고조파 성분을 가지고 있으며, 회전자 코어 두께 변화가 3고조파 성분의 크기를 변화시킨 않음을 확인할 수 있다. 두께가 5[mm]에서 2[mm]로 감소함에 따라 기본파인 1고조파 성분은 약 6.84[%] 감소하였다. 평행방향 착자의 경우 기본파 성분 외에도 3고조파 성분과 미량의 5고조파 성분을 포함하고 있으며, 코어의 두께가 증가함에 따라 3고조파의 크기 또한 증가하는 것을 볼 수 있다.

〈표 3〉 회전자 코어 두께에 따른 무부하 역기전력 고조파 성분

	Halbach 착자			Parallel 착자		
	1 <sup>st</sup> [V]	3 <sup>rd</sup> [V]	5 <sup>th</sup> [V]	1 <sup>st</sup> [V]	3 <sup>rd</sup> [V]	5 <sup>th</sup> [V]
2mm	136.2	0.3	0.0	102.7	6.0	0.0
3mm	144.0	0.2	0.0	122.0	6.5	0.2
4mm	145.9	0.3	0.0	139.4	7.4	0.2
5mm	146.0	0.3	0.0	152.5	8.3	0.3



〈그림 4〉 회전자 코어 두께에 따른 무부하 역기전력의 기본파 성분 비교

역기전력의 3고조파 성분은 전동모드 시 정현파 입력에 대해 토크리플을 발생시키지 않으며, 발전모드 시 단자전압의 정현성에 도움을 줄 수 있다. 그림 4는 회전자 코어 두께에 따른 무부하 역기전력의 기본파 성분을 비교하여 보여주고 있다. 4[mm]에서 2[mm]로 감소하면서 Halbach 착자가 평행방향 착자보다 큰 역기전력 기본파 성분을 갖지만, 4[mm]에서 5[mm]로 두께가 커지면서 오히려 평행방향 착자의 역기전력 기본파 성분이 커지는 것을 확인할 수 있다.

## 3. 결 론

본 논문은 플라이휠 에너지 저장 시스템용 양축식 영구자석 동기 전동발전기의 착자 형태에 따른 특성 비교에 대해 다루었다. 철손이 없는 양축식 영구자석 회전자 형태에 대해 Halbach 착자와 평행방향 착자로 착자 형태를 달리하여 회전자 코어 두께를 변화시키면서 전동발전기의 특성을 비교 해석하였다. 해석결과 반경방향 착자의 경우 자속의 포화로 인해 코어 두께에 따라 자기 에너지 이용량의 변화가 큰 것으로 나타났으며, Halbach 착자는 자기차폐에 의해 코어의 두께 변화에 대해 크게 영향 받지 않음을 확인하였다. 실제 제작성을 고려한 양축식 전동발전기의 설계의 경우, 회전자 코어의 두께는 전동발전기의 구조적인 안정성 또한 고려하여 설계 되어져야 하며, 코어 두께의 대한 설계 제반사항이 주어지면, Halbach 착자 또는 평행방향 착자 영구자석 회전자의 적절한 사용이 필요시 된다.

## [참 고 문 헌]

- [1] Jeong-Phil Lee, Byung-Jun. Park, Young-Hee Han, Se-Yong Jung, and Tae-Hyun Sung, "Energy Loss by Drag Force of Superconductor Flywheel Energy Storage System With Permanent Magnet Rotor", IEEE TRANSACTIONS ON MAGNETICS, VOL. 44, NO. 11, NOVEMBER 2008.
- [2] Z. Q. Zhu, D. Howe, "Halbach permanent magnet machines and applications: a review", IEE Proc.-Electr. Power Appl, Vol. 148, No. 4, July 2001.
- [3] Z. Q. Zhu, Z. P. Xia, and D. Howe, "Comparison of Halbach Magnetized Brushless Machines Based on Discrete Magnet Segments or a Single Ring Magnet", IEEE TRANSACTIONS ON MAGNETICS, VOL. 38, NO. 5, SEPTEMBER 2002.