

대체에너지 시스템의 출력 평준화를 위한 EMB용 초고속 전동발전기

장석명, 윤인기, 류동완\*, 최상규\*\*, 윤기갑\*\*\*  
 충남대학교(042-821-7608), (주)효성\* 한국기계연구원\*\*, 한국전력연구원\*\*\*

High Speed Motor/Generator of an Electro-Mechanical Battery  
 for Power Averaging of Alternative energy system

S.M.Jang, I.K.Yoon, D.W.Ryu,\* S.K.Choi\*\*, K.K. Yoon\*\*\*  
 Chungnam National University, HYOSUNG,\* KIMM\*\* ,KEPRI\*\*\*

**Abstract** - High speed brushless permanent magnet (PM) machines are a key technology for electric drives and motion control systems for many application, since they are conductive to high efficiency, high power density, small size and low weight. Proposed slotless PM machine is constructed without stator winding slots. Its stator magnetic material is in the form of a ring and winding have a toroidal configuration and its rotor consists of a 4-pole Halbach array or radially magnetized PM rotor.

전 운동에너지 형태로 저장하였다가, 필요시에는 전기에너지로 출력하여 사용하도록 하는 에너지 변환장치인 전동발전기이다. 그림 2는 두 가지 형태의 영구자석 전동발전기가 적용될 내전형 FESS를 나타낸다. 내전형 시스템에서는 고정자가 바깥에, 회전자가 안쪽에 위치하여 회전하고 전동발전기의 회전자가 플라이휠과 간접적으로 연결되며 두 개의 전자석 자기배어링을 갖는다.

본 논문에서 FESS용으로 제안된 초고속 전동발전기 모델의 회전자는 4극의 외부자계를 형성하기 위한 영구자석 Halbach 배열을 가지며 링형의 슬롯이 없는 고정자를 갖는다. 한편, 제안되어진 전동발전기의 특성비교를 위해 기존의 반경방향으로 자화된 영구자석 회전자를 갖는 슬롯리스 모델을 제시하였다.

1. 서 론

전기역학전지(Electro-Mechanical Battery : EMB) 시스템은 전기역학적인 에너지 저장방식의 일종으로 잉여 전력에너지를 플라이휠의 운동에너지로 변환하여 저장하였다가 필요시에는 전기에너지로 다시 변환하여 사용하는 에너지 저장시스템으로써 흔히 플라이휠 에너지 저장 시스템(Flywheel Energy Storage System : FESS) 이라고도 부른다. 이러한 EMB 시스템은 효율을 극대화하기 위하여 고강도 플라이휠을 진공 속에서 고속으로 회전시키며, 또한 자기배어링을 사용하여 마찰 없이 회전한다. EMB 시스템은 효율이 98% 이상으로 같은 기계적 에너지 저장장치인 양수발전은 물론이고 화학적 에너지 저장장치인 화학전지와 비교해서 에너지 저장효율이 높으며, 순시 충·방전이 가능하고 수명이 반 영구적이다. 더구나 화학전지와는 달리 저온에서 상대적으로 성능저하가 없다는 장점을 가지며 또한 입지절약형, 분산형, 저공해형, 기술집약형의 미래지향적 에너지 저장시스템으로 그 활용범위가 확대되고 있다.

FESS에서 가장 핵심이 되는 요소 중 하나인 전동발전기에 있어서, 슬롯형 영구자석 브러시리스 기기는 초고속 운전시 슬롯 리플에 의해 영구자석과 도전성 슬리브에서의 와전류 손실, 코깅 토크에 의한 소음 및 진동이 크게 문제된다. 또한 영구자석 Halbach 배열형 코어리스 기기는 철심이 없기 때문에 손실 및 코깅 토크 문제가 발생하지 않으나 고속 운전에 유리하지만 영구자석의 이용률, 즉 영구자석 중량당 발생자속이 매우 작다[1]. 본 논문에서는 슬롯형 기기와 Halbach형 기기의 단점을 각각 보완한 새로운 형태의 슬롯리스(slotless) 영구자석 기기를 제안한다.

2. FESS용 영구자석형 전동발전기

2.1 영구자석형 전동발전기 모델

그림 1은 EMB 시스템의 개략적인 구조를 보여주고 있다. FESS에서 가장 핵심이 되는 요소 중 하나는, 회전체인 플라이휠을 구동하여 입력되는 전기에너지를 회

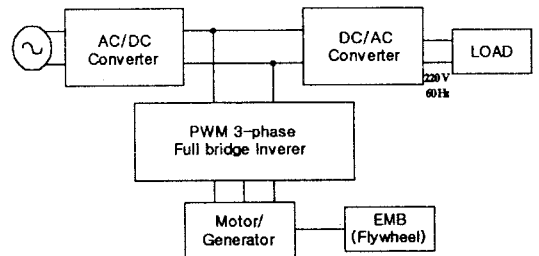


그림 1. 전동발전기 시스템의 구성도

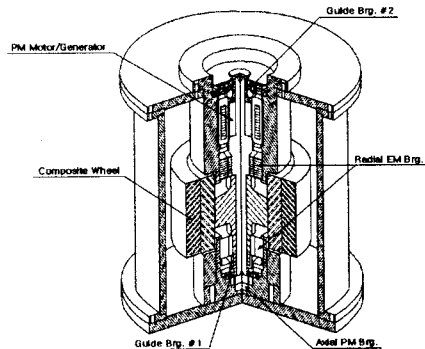


그림 2. 플라이휠 에너지 저장 시스템

슬롯리스 기기의 고정자는 그림 3과 같이 링형의 요크에 환상형 권선을 감거나 요크의 안쪽에 권선을 시행한

다. 구조적으로 고정자에 슬롯이 존재하지 않으므로 공극자속밀도 분포는 정현적이다. 따라서 이에 따른 고조파 손실이 거의 없으므로 초고속 구동에 적합한 것으로 알려져 있다. 한편, 영구자석 배열에 따라 회전자는 그림 3(a)의 반경방향으로 착자된 형태와 그림 3(b)의 Halbach 배열에 의한 형태로 구성할 수 있다. 반경방향 착자 모델의 경우 자속경로를 만들어주기 위해 비자성체축의 바깥쪽에 철심을 삽입하거나 축 자체를 자성체로 구성할 수 있다. 그러나, Halbach 배열의 경우에는 자기 차폐 특성에 의해 배열 안쪽에 철심을 삽입하지 않을 수도 있다. 그림 4는 회전자 영구자석 배열에 따른 슬롯리스 기기의 자속 분포를 보여준다.

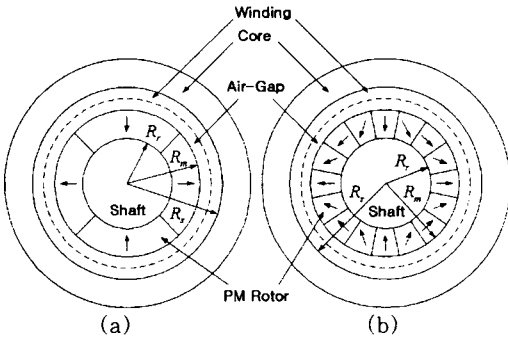
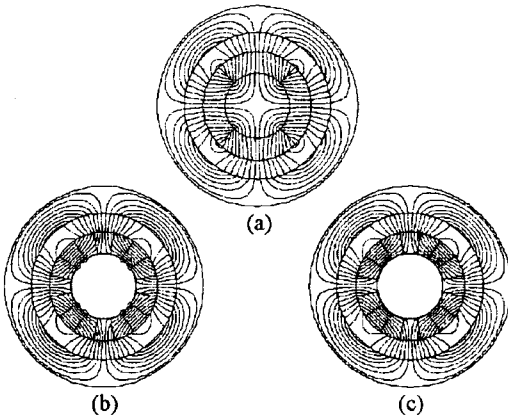


그림 3. 3상, 4극 슬롯리스 전동발전기  
(a) 반경방향 자화를 갖는 영구자석 회전자  
(b) Halbach 배열을 갖는 영구자석 회전자



(a) 반경방향 자화 (b) Halbach 배열(자성체 축)  
(c) Halbach 배열(비자성체 축)

그림 4 회전자 영구자석 배열에 따른 슬롯리스 기기의 자속 분포

## 2.2 영구자석에 의한 공극자속밀도

슬롯의 영향을 무시하고, 영구자석의 상대 리코일 투자율이 1.0이라고 가정하면 Halbach 기기의 고정자 보어에서의 자속밀도는 식 (1)과 같다[2].

$$B_g(\theta) = B_m \sin(p\theta) \\ = \frac{2B_r p}{(p+1)} \left[ 1 - \left( \frac{R_r}{R_m} \right)^{(p+1)} \right] \times K \left( \frac{R_m}{R_r} \right)^{(p+1)} \sin(p\theta) \quad (1)$$

여기서 기호는 그림 3에서 각각 보이며,  $B_r$ 은 잔류자속 밀도,  $p$ 는 극 쌍수이다. 공심 코어 회전자의 경우  $K=1$ 이며, 철심 코어 회전자의 경우  $K$ 는 식 (2)와 같다.

$$K = \left[ 1 - \left( \frac{R_r}{R_m} \right)^{2p} \left( \frac{R_m}{R_s} \right)^{2p} \right]^{(-1)} \quad (2)$$

한편, 일반형태의 기기인 경우  $np=1$ 이면, 고정자 보어에서의 자속밀도는 식(3)과 같이 주어지며,  $np \neq 1$ 이면, 식(4)와 같이 주어진다. 식 (3)과 식(4)에서  $\mu_r$ 은 영구자석의 리코일 투자율,  $M_n$ 은 식 (5)와 같다.

그림 5는 3가지 모델의 비교 그래프로써 고정된  $R_m/R_r$  비를 갖는 경우에 3가지 모델의  $R_r/R_m$ 의 비를 변화시키면서 최대 공극자속밀도의 변화를 보여준다. 그림에서 보듯이 식 (1)과 식(3), 식 (4)의 해석적 방법과 유한요소 해석 결과가 잘 일치함을 볼 수 있다. 또한 Halbach 배열형의 공심 및 철심형 모두  $R_r/R_m$ 이 감소함에 따라 자속밀도가 증가하고  $R_r/R_m=0.5$ 이하에서는 증가율이 급격히 감소하였다. 그러나 반경방향으로 자화된 회전자의 경우  $R_r/R_m=0.7$ 이하에서 급격히 자속밀도의 증가율이 감소하였다. 따라서  $R_r/R_m$ 이 작은 경우, 즉 자석 두께가 두꺼울 수록 Halbach 배열의 자속밀도 특성이 매우 우수함을 알 수 있다.

$$B_g(\theta) = \frac{\mu_0 M_n}{\mu_r} \left\{ \frac{\left( \frac{R_m}{R_r} \right)^2 - \left( \frac{R_r}{R_s} \right)^2 + \left( \frac{R_r}{R_s} \right)^2 \ln \left( \frac{R_m}{R_r} \right)^2}{\frac{\mu_r + 1}{\mu_r} \left[ 1 - \left( \frac{R_r}{R_s} \right)^2 \right] - \frac{\mu_r - 1}{\mu_r} \left[ \left( \frac{R_m}{R_s} \right)^2 - \left( \frac{R_r}{R_m} \right)^2 \right]} \right\} \cos \theta \quad (3)$$

$$B_g(\theta) = \sum_{n=1,3,5,\dots}^{\infty} 2 \frac{\mu_0 M_n}{\mu_r} \frac{np}{np^2 - 1} \left( \frac{R_m}{R_r} \right)^{np+1} \cdot \left\{ \frac{(np-1) + 2 \left( \frac{R_r}{R_m} \right)^{np+1} - (np+1) \left( \frac{R_r}{R_m} \right)^{2np}}{\frac{\mu_r + 1}{\mu_r} \left[ 1 - \left( \frac{R_r}{R_s} \right)^{2np} \right] - \frac{\mu_r - 1}{\mu_r} \left[ \left( \frac{R_m}{R_s} \right)^{2np} - \left( \frac{R_r}{R_m} \right)^{2np} \right]} \right\} \cos np\theta \quad (4)$$

$$M_n = 2(B_r / \mu_0) \alpha_p \frac{\sin \frac{n\pi \alpha_p}{2}}{\frac{n\pi \alpha_p}{2}} \quad (5)$$

여기서  $\alpha_p$ 는 자석 극호와 극피치 사이의 비이다.

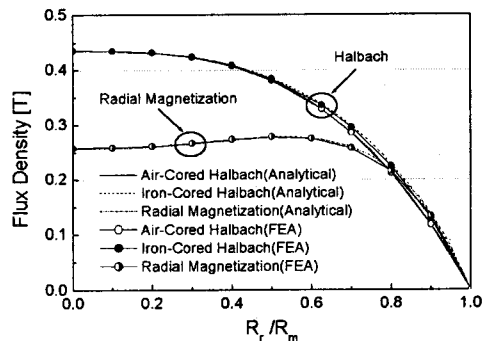


그림 5  $R_r/R_m$ 에 따른 최대 공극자속밀도 비교

### 2.3 공극자속밀도의 고조파 분석

그림 6은 공극자속밀도 분포로 Halbach배열형 모델이 반경방향 착자형에 비해 공극자속밀도가 0.1T 정도 크며 철심 또는 공심축을 사용하여도 공극자속밀도의 크기는 거의 동일하였다. 또한 표 1은 두 모델에 대한 공극자속밀도 분포의 고조파 분석 결과로 Halbach 배열형 모델은 기본파 외의 공간고조파가 거의 존재하지 않고, 이러한 공간고조파 스펙트럼은 자석의 두께가 변함에 따라서도 동일하게 나타났다.

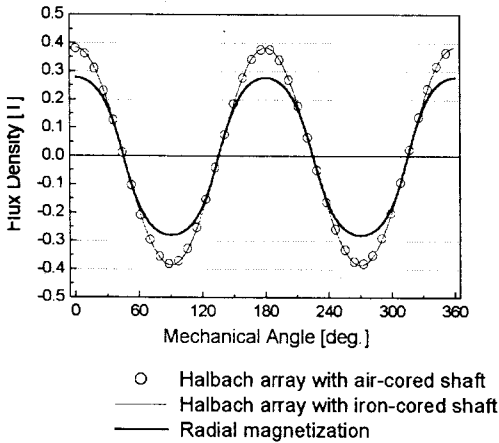


그림 6 공극자속밀도분포

( $R_r/R_m = 0.5, R_m/R_s = 0.653$ )

표 1. Airgap Flux Density FFT( $R_r/R_m = 0.5$ )

Harmonic Order	1	3	5
Air-Cored Halbach	0.381	-	-
Iron-Cored Halbach	0.384	-	-
Radial Magnetization	0.299	0.023	0.003

### 2.4 전자기적 발생 토크

영구자석형 브러시리스 AC 모터의 경우 전자기적 토크는 식 (6)과 같다.

$$T_{em} = 3\sqrt{2} r k_w p N_{ph} B_{gm} L_a I \sin \gamma \quad (6)$$

여기서  $k_w$ 는 권선계수,  $p$ 는 극 쌍수,  $N_{ph}$ 는 상당 턴수,  $B_{gm}$ 공극 자속밀도의 최대치,  $L_a$ 는 유효 스택길이,  $I$ 는 상전류의 실효값,  $\gamma$ 는 유기전압과 전류와의 위상각이다. Halbach 배열 회전자자의 경우  $B_{gm} = B_m$ , 반경방향 자화 회전자자의 경우  $B_{gm}$ 은 식 (3)과 (4)에서  $n=1$ 인 경우와 같다.

그림 7은  $R_r/R_m$ 의 변화에 따른 토크 특성을 보여주고 있다. Halbach 모터가 고정자에서 자속밀도의 값이 더 크며, 자속밀도의 왜곡이 더 작기 때문에 손실이 더 적게되고 그에 따라서 토크 성능 역시 증가하게 된다.

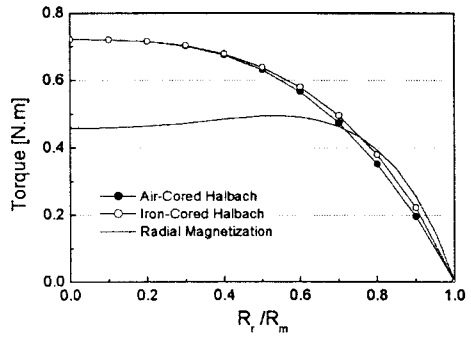


그림 7  $R_r/R_m$ 의 변화에 따른 토크 특성

### 3. 결 론

본 논문에서는 슬롯형 기기와 Halbach형 기기의 단점을 각각 보완한 새로운 형태의 슬롯리스(slotless) 영구자석 기기를 연구하였다. 즉, 슬롯리스 기기의 공극자속밀도 특성을 향상시키고자 초고속 구동에 적합한 4극 영구자석 Halbach 배열형 회전자자를 갖는 슬롯리스 브러시리스 기기를 제안하였다. 또한 이를 일반적인 반경방향 착자형 영구자석 회전자자를 갖는 기기와 비교, 검토한 결과 Halbach 배열 영구자석 회전자자를 갖는 기기의 경우 공극자속밀도가 매우 정현적 이었으며, 영구자석 체적당 자속밀도가 높고 축의 재질에 따라 공극자속밀도의 변화가 거의 없으므로 Halbach 배열형 모델이 회전자 재질 선정에도 자유롭다는 것을 알 수 있었다. 따라서 Halbach 배열을 갖는 슬롯리스형 전동발전기가 EMB 시스템에 적합함을 확인할 수 있었다.

### (참 고 문 헌)

- [1] S.M.Jang, S.S.Jeong, D.W.Ryu, S.K.Choi, "Comparison of three types PM brushless machines for an electro-mechanical battery", IEEE Trans. on Magnetics., September 2000(Will be published)
- [2] K. Atallah and D. Howe, "The Application of Halbach Cylinders to Brushless AC Servo Motors", IEEE Transactions on Magnetics, VOL. 34, NO. 4, JULY 1998.
- [3] Z. Q. Zhu, D. Howe, E. Bolte and B. Ackermann, "Instantaneous Magnetic Field Distribution in Brushless Permanent Magnet dc Motors, Part I: Open-Circuit Field", IEEE Transactions on Magnetics, VOL. 29, NO. 1, JANUARY 1993
- [4] K. Halbach, "Perturbation Effects in Segmented Rare Earth Cobalt Multipole Magnets", Nuclear Instrument and Methods 198, 1982
- [5] J. R. Hendershot Jr, TJE Miller, "Design of Brushless Permanent-Magnet Motors", Oxford, 1994