

EMB용 전동발전기 선정을 위한 슬롯형과 슬롯리스 Ring-wound형 영구자석 브러시리스 기기의 특성 비교

論 文
50B-3-2

Comparison of Slotted and Slotless Ring-Wound PM Brushless Machines for Electro-Mechanical Battery

張錫明* · 鄭相燮** · 柳東完*** · 崔相奎[§]

(Seok-Myeong Jang · Sang-Sub Jeong · Dong-Wan Ryu · Sang-Kyu Choi)

Abstract - Electro-mechanical battery (EMB) consists of a high-speed flywheel with an integral motor/generator suspended on magnetic bearings and in an evacuated housing. Permanent magnet (PM) machines as the EMB motor/generator are a popular choice, since there are no excitation losses which means substantial increase in the efficiency. In this paper we present the comparison of conventional slotted and slotless ring-wound types, aimed at EMB and other high-speed drives. We firstly discuss the topology of each machine for this particular application. These machines are primarily designed as 1kW two-pole PM generator with the rated speed of 40000 rpm. The motoring torque of 0.51 Nm has to be enough to accelerate the flywheel to the rated speed. We then present the comparison of the open-circuit field, the armature reaction field and winding inductance. Next we analyze the induced voltage and the developed torque per unit stack length and unit weight of different machines. Finally, we estimate and compare the losses and the efficiency at motoring and generating modes.

Key Words : EMB, FESS, high-speed, slotless, ring-wound

1. 서 론

전기기계 전지(Electro-Mechanical Battery : 이하 EMB라 함)는 전기역학적인 에너지 저장방식의 일종으로 화학전지와 같이 소형화, 모듈화가 가능하고 흔히 플라이휠 에너지 저장 시스템(Flywheel energy storage system : 이하 FESS라 함)라고도 불린다. EMB는 자기베어링, 복합재 등의 부속기술의 개발 및 발전에 힘입어 양수발전은 물론 화학전지와 비교해서도 에너지 저장 효율이 매우 높으며, 순시 충·방전이 가능하고 수명이 반영구적이다[1,2]. 더구나 화학전지와는 다르게 저온에서 상대적으로 성능 저하가 없다는 장점을 가진다[1,2]. 따라서 입지절약형, 분산형, 저공해형, 기술집약형의 미래 지향적 에너지 저장 시스템으로 우주 및 항공산업이나 잠수함, 전기자동차 등과 같은 특수 첨단분야에서의 필수 핵심요소로 그 활용범위가 확대되고 있다.

EMB에서 가장 핵심이 되는 요소 중 하나는, 회전체인 플라이휠을 구동하여 입력되는 전기에너지를 회전운동에너지 형태로 저장하였다가, 필요시에는 전기에너지로 출력하는 전동발전기이다. 그런데 EMB 시스템이 고밀도 에너지 저장

장치가 되기 위해서는 플라이휠뿐만 아니라 전동발전기도 운전속도를 수만부터 수십만 rpm정도까지 초고속화를 이루어야만 한다. 따라서 전동발전기는 초고속 구동에 따른 스트레스를 견딜 수 있는 회전자 형상을 가져야 한다. 특히 손실에 의한 발열이 최소화 된 회전자를 가져야 하며 고효율, 저가의 제작비용 등과 같은 특징이 요구된다[2,3]. 따라서 계자에 따른 손실이 없으므로 높은 효율을 얻을 수 있고, NdFeB와 같은 고밀도의 자석을 사용함으로써 고휘력 에너지를 얻을 수 있는 영구자석 브러시리스 기기가 대부분의 EMB에 응용되고 있다[2,4].

한편, 고속 영구자석 기기에 관한 연구는 영국의 Atallah, Zhu, How가 마찰에 의한 용접 시스템에 20,000rpm, 1.3kW 용량의 슬롯형 영구자석 전동기를 적용한 경우를 비롯하여 슬롯리스 영구자석기기의 연구가 가장 활발히 이루어지고 있다[5,6]. 또한 Hesmondhaigh는 150,000rpm, 10W 슬롯형 전동기를 금속절단용 수공구에 응용하였으며 Isao Takahashi는 150,000rpm, 1.5kW를 갖는 기기에 관한 연구를 수행하였다[7,8]. 그밖에 30,000rpm, 40kW급 가스터빈 발전기, 90,000rpm 급 자동차용 발전기, 13,000rpm, 16kW급 항공기 연료 펌프 등에 고속용 슬롯형 영구자석 기기가 응용되고 있다[9,10,11].

특히 EMB에 응용하기 위해 Hofmann, Sanders, Fukao의 동기형 릴럭턴스 전동발전기를, Merritt, Post는 영구자석 Halbach 배열을 이용한 예는 있다[2,12,13]. 그러나 EMB에 적용하기 위한 슬롯형이나 슬롯리스형에 대한 연구와 전동발전기의 종류 선정 및 특성비교 등에 관련한 연구 논문은 발표되고 있지 않다. 이는 고속 전기기기는 전기, 기계, 재료 등의 복합 기술로서 그 개념과 설계 특성식의 정립과 전기

* 正 會 員 : 忠南大 電氣工學科 教授 · 工博

** 正 會 員 : 忠南大 電氣工學科 博士課程

*** 正 會 員 : EMBEST(주) 研究員

[§] 非 會 員 : 韓國機械研究院 先任研究員

接受日字 : 2000年 5月 24日

最終完了 : 2001年 2月 22日

기계적인 손실 메카니즘 확립, 고속 회전체의 동특성 해석, 베어링 설계 및 제작 기술, 운전 및 제어 기술 등이 어렵기 때문이다.

본 논문에서는 초고속 에너지 저장 시스템인 내전형 EMB에 적용될 슬롯형과 슬롯리스 Ring-wound형 기기의 특성 비교를 위해 각 모델의 영구자석 전동발전기의 토폴로지와 설계 및 특성 해석 결과를 비교하였다. 각 모델은 1kW, 2극 40,000rpm급 발전기로, 전동모드에서는 정격 속도까지 플라이휠을 충분히 가속할 수 있는 토크를 발생시키도록 설계하였다. 또한 공간고조파를 최소로 하기 위해 직경방향으로 자화된 영구자석 회전자를 가지며 이에 따른 자계 및 공극자속밀도 분포특성을 해석함으로써 영구자석 중량 당 발생 자속을 비교하였다. 그리고 각 모델의 전기자 전류에 의한 자계 특성과 자기 및 상호 인덕턴스 특성을 비교하였다.

두 모델은 정현파 유기전압 파형을 갖는 비돌극형 영구자석형 동기전동기로서 단위 스택길이 또는 중량 당 유기전압 및 발생 토크를 비교하였으며, 각 모델의 동손과 교번 자속에 의한 고정자 철손, 그리고 슬롯형 기기의 경우 슬롯리플에 의한 회전자에서의 와전류 손실을 계산하여 비교하였다. 이를 통해 전동 및 발전 모드시 효율을 예측하였다.

2. EMB용 영구자석형 전동발전기

2.1 영구자석형 전동발전기 모델

(1) EMB 시스템의 개요

그림 1은 내전형 EMB 시스템으로 전동발전기의 회전자가 복합재 플라이휠과 간접적으로 연결되며 회전체의 접촉마찰을 줄이기 위해 1개의 축방향 자기베어링과 2개의 반경방향 자기베어링을 사용하였다. 또한 플라이휠과 전동발전기는 공기마찰을 최소로 하기 위해 진공용기 안에 놓인다. 따라서 전동발전기의 손실은 동손과 고정자 철손, 그리고 영구자석 회전자에서의 와전류 손실만이 존재한다고 가정할 수 있다[15].

(2) 초고속 전동발전기 모델

그림 2와 그림 3은 내전형 EMB 시스템에 적용될 영구자석 전동발전기로서 슬롯형과 슬롯리스 Ring-wound형(이하

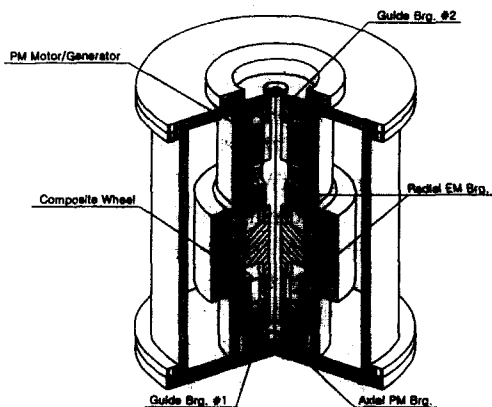
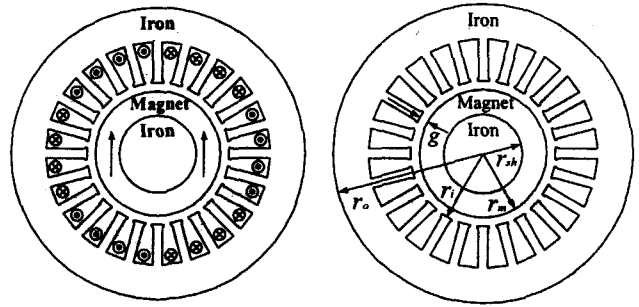
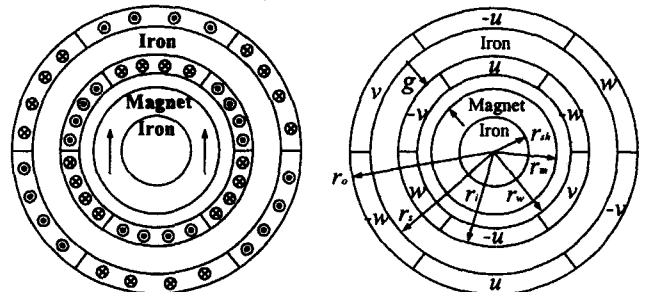


그림 1 내전형 플라이휠 에너지 저장 시스템의 개략도
Fig. 1 Flywheel energy storage system



(a) Schematic model (b) Symbol

그림 2 슬롯형 영구자석 브러시리스 전동발전기
Fig. 2 Slotted PM Brushless motor/generator



(a) Schematic model (b) Symbol

그림 3 슬롯리스 Ring-wound형 영구자석 브러시리스 전동발전기

Fig. 3 Slotless ring-wound PM Brushless motor/generator

표 1 토폴로지 비교

Table 1 Comparison of topology

항목\형태	슬롯형	슬롯리스 Ring-wound형
브러시	×	×
슬롯	○	×
철심	○	○
권선법	분포권, 전절권	슬레노이드형, 전절권
회전자		내전형
영구자석/축 재질		직경방향 자화/자성체

슬롯리스형(이하) 모델의 개략도로 각각 표 1과 같은 토폴로지를 갖는다[16]. 그림 2와 같은 슬롯형 영구자석 브러시리스 기기는, 고정자 철심에는 슬롯이 있으며 여기에 분포권, 전절권 형태의 3상 권선을 시행한다. 또한 그림 3과 같은 슬롯리스형은 슬롯이 없는 링형태의 고정자 철심에 3상 권선을 슬레노이드 형태로 코일을 감는다. 또한, 두 모델 모두 고속 회전시에 과중한 스트레스를 견딜 수 있는 구조의 실린더형 영구자석을 사용하였으며 영구자석의 이탈을 막기 위해 FRP로 감싼다. 또한 회전자는 공간고조파를 줄이기 위해 직경방향으로 자화된 2극 영구자석과 자성체 축으로 구성된다.

2.2 정현파 영구자석형 전동발전기의 특성 방정식

(1) 영구자석에 의한 공극자속밀도

슬롯형과 슬롯리스형 전동발전기는 직경방향으로 자화된 2극 영구자석 회전자를 가지므로 공극에서의 반경방향 자속밀도는 정현적이다[5]. 다만, 슬롯형인 경우에는 슬롯리플에 의해 공간고조파가 존재하며 슬롯리스형은 기본파만 존재한다. 따라서 두 모델에서 반경방향 공극자속밀도 분포의 기본파만을 고려한다면 식 (1)과 같이 표현된다.

$$B_r(\theta) = B_m \sin(\theta) \tag{1}$$

여기서 θ 는 전기각, B_m 은 유효공극에서의 반경방향 자속밀도의 최대값으로 식 (2)와 같다[5].

$$B_m = \frac{B_{rem} \left[1 - \frac{r_{sh}^2}{r_m^2} \right] \left[\frac{r_m^2}{r_i^2} + \frac{r_m^2}{r_e^2} \right]}{\left[1 + \frac{r_m^2}{r_i^2} \right] \left[1 - \frac{r_{sh}^2}{r_m^2} \right] + \mu_r \left[1 - \frac{r_m^2}{r_i^2} \right] \left[1 + \frac{r_{sh}^2}{r_m^2} \right]} \tag{2}$$

여기서 B_{rem} 과 μ_r 은 각각 영구자석의 잔류자속밀도와 상대 투자율이며, r_i , r_m , r_{sh} 는 각각 고정자 철심의 안쪽 반경, 회전자 영구자석 및 회전축 반경을 나타낸다. 또한, r_e 는 유효 공극의 반경으로 슬롯형은 $(r_i + r_m)/2$, 슬롯리스형은 $(r_i + r_w)/2$ 로 정의된다.

(2) 유기전압 및 발생 토크

개방회로의 상당 유기전압의 실효값은 식 (3)과 같이 계산된다.

$$E = \omega_s \Psi_{M1} \tag{3}$$

여기서 ω_s 는 전기적 동기각속도, Ψ_{M1} 는 상당 자석에 의한 기본파 쇄교 자속의 실효치로 식 (4)와 같다.

$$\Psi_{M1} = \frac{k_{w1} N_{ph} \Phi_{M1}}{\sqrt{2}} \tag{4}$$

여기서 k_{w1} 은 권선계수, N_{ph} 는 상당 턴수, Φ_{M1} 은 자석에 의한 기본파 자속으로 식 (5)와 같다.

$$\Phi_{M1} = \frac{2}{\pi} B_m A_{pole} \tag{5}$$

여기서 B_m 은 최대 자속밀도, A_{pole} 은 유효 공극에서 한 극의 단면적이다. 따라서 상당 유기전압의 실효치는 식 (4)와 식 (5)을 통해 식 (6)과 같이 계산된다.

$$E = \sqrt{2} r_e I_a B_m k_{w1} N_{ph} \omega_s \tag{6}$$

여기서 I_a 는 전동발전기의 축방향 유효길이다.

한편, 그림 2와 그림 3의 두 형태 모두 정현파 유기전압 파형을 갖는 비돌극형 영구자석형 동기전동기이므로 그림 4와 같은 페이저도에 의해 특성을 해석할 수 있으며 d축과 q축 리액턴스가 동일하다. 페이저 RI 와 $jX_s I$ 는 각각 상저항과 동기 리액턴스에 의한 전압 강하이며 이를 역기전력

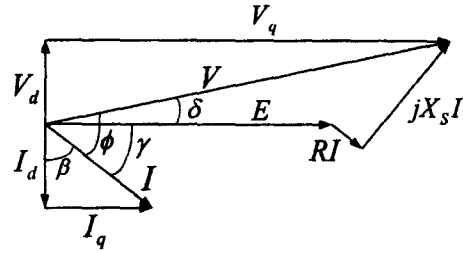


그림 4 비돌극기 정현파 전동기의 페이저도
Fig. 4 Phasor diagram of non-salient pole sinewave motor

E 와 합하면 식 (7)과 같이 공급되는 단자 전압과 동일하다.

$$V = E + (R + jX_s) I \tag{7}$$

따라서 발생 토크식은 식 (8)과 같으며 일반 비돌극 동기기의 발생 토크식과 동일하다.

$$T_e = \frac{3}{\omega_m} E I \sin \gamma \tag{8}$$

여기서 ω_m 은 기계적 각속도, I : 상전류 실효치, γ : 유기전압과 전류와의 위상각이다.

2.3 설계 조건 및 사양

EMB용 전동발전기의 두 모델은 1kW, 2극 4000rpm 급 발전기로 설계되었으며 전동모드에서는 정격 속도까지 플라이휠을 충분히 가속할 수 있는 토크를 발생시켜야 한다. 또한 두 모델에 공통적으로 적용되는 설계 제약 조건은 시스템의 요구사양에 따라 기기의 길이와 외경은 각각 90mm 이내, 68mm로 제한되며, 축반경과 FRP 슬리브의 두께는 각각 10mm, 1mm이다. 슬롯형 기기의 설계에 있어서 슬롯 개구 폭은 공극 자속의 리플을 줄이기 위해 가능한 작게 설계해야 하지만 권선 작업을 고려하여 최소 1.5mm로 결정하였다.

또한, 공극길이는 영구자석과 고정자간의 전자기적 결합도를 높이기 위해 기계적인 허용범위 이내에서 가능한 작게 설정해야 한다. 그러나 공극이 작을 경우에 슬롯 리플의 증가로 인하여 회전자에 와전류 손실이 증가하므로 유도기 또는 릴럭턴스 기기에 비해 크게 설계되었으며 이는 자기베어링 시스템의 안정적 운전에도 도움이 된다. 슬롯리스형 기기의 자기적 공극길이는 슬롯형에 비해 매우 크며 코일 설계, 즉 권선 폭에 의해 따라 달라진다.

표 2는 전동발전기의 주요 설계 사양으로 식 (1)에서 식(8)까지의 특성식에 의해 각각 설계되었다. 설계 결과를 비교해 보면 스택 길이는 슬롯리스형이 슬롯형보다 30% 정도 기기가 길어졌으며, 중량은 슬롯리스형이 다소 가볍게 설계되었다.

3. 영구자석 및 전기자 전류에 의한 자계 특성 비교

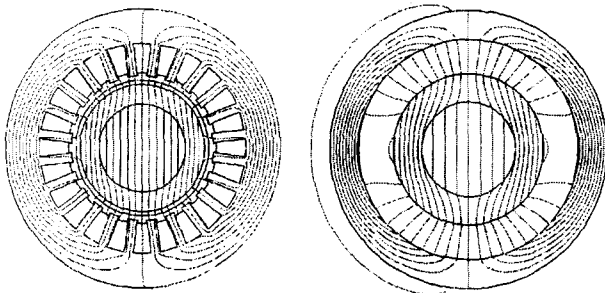
3.1 영구자석에 의한 자계 특성

그림 5는 두 모델의 영구자석에 의한 자속 분포로 슬롯형과 슬롯리스형은 직경방향으로 자화된 영구자석에 의해 2극

표 2 주요 설계 사양

Table 2 Design Specification of Two Type Machine

항목\형태	슬롯형	슬롯리스형
발전 출력		1,000 W
최대 운전 속도		40,000 rpm
정격 토크		0.51Nm
발전 선간 전압		180 V
기기의 스택 길이	65.0 mm	84.0 mm
고정자 직경	68.0 mm	68.0 mm
중량	1.47 kg	1.37 kg
자기적 공극	2.0 mm	7.4 mm
기계적 공극	1.0 mm	1.0 mm
상당 턴수	24	24



(a) slotted type (b) Slotless type

그림 5 영구자석에 의한 자계 분포

Fig. 5 Open circuit magnetostatic field distribution

자계를 구성되므로 그림 6과 같이 정현적인 반경방향 공극자속밀도 분포를 갖는다. 그러나 그림 7의 공간고조파 스펙트럼에서 보듯이 슬롯형의 경우 다수의 공간고조파가 함유되어 있는 반면 슬롯리스형은 매우 정현적인 분포를 갖는다.

표 3은 두 모델의 반경방향 공극자속밀도의 최대값과 영구자석 중량, 그리고 유효자속 및 영구자석 단위 중량당 자속을 비교하였다. 표에서 유효 공극의 반경에서 자속밀도의 최대값의 경우 유효요소해석 결과와 식(2)의 이론적 해석 결과와 거의 일치함을 볼 수 있다. 또한 슬롯형과 거의 동일한 자속을 얻기 위해서는 슬롯리스형은 두 배 이상의 영구자석이 필요하므로 슬롯형이 슬롯리스형에 비해 영구자석의 이용률이 높다.

3.2 전기자 전류에 의한 자계 특성

그림 8은 3상 전기자 권선 중 한 상만을 여자시켰을 때의 자속 분포이다. 전기자의 관점에서 보면, 공극은 자석 두께를 포함하고 있으며, 특히 슬롯리스형의 경우에는 자석의 두께뿐만 아니라 권선의 두께까지 공극에 포함되므로 매우 큰 자기저항 경로를 가진다. 그림 9와 그림 10은 각각 유효요소해석에 의한 1상 및 3상 여자시 유효 공극 반경에서의 반경방향 자속밀도의 분포를 보여 준다. 3상 여자시 자속밀도 분포는 두 모델 모두 왜형된 정현파를 갖지만 그 절대치는 영구자석에 의한 자계에 비해 매우 작으므로 영구자석에 의한 영향, 즉 전기자 반작용은 매우 작음을 예상할 수 있다.

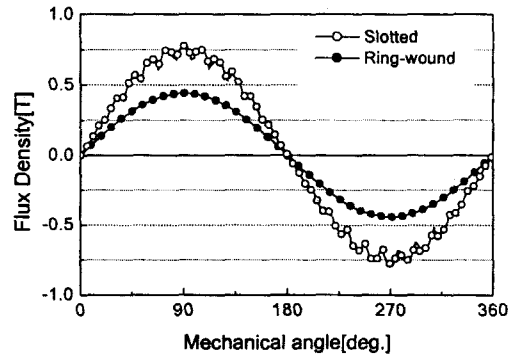
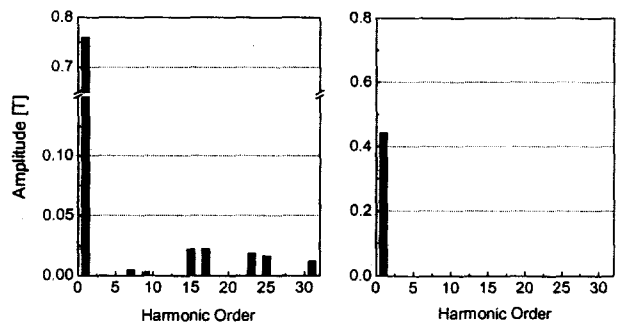


그림 6 영구자석에 의한 자계 분포

Fig. 6 Open circuit magnetostatic field distribution



(a) slotted type (b) Slotless type

그림 7 반경방향 공극자속밀도의 고조파 스펙트럼

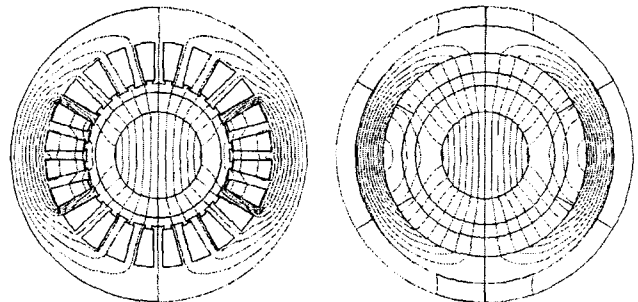
Fig. 7 Harmonic spectrum of radial airgap flux density

표 3 공극 자속밀도 비교

Table 3 Comparison of Airgap Flux Density

항목\형태	슬롯형	슬롯리스형
유효 공극의 반경	15 mm	21.2 mm
공극자속밀도 최대값*	0.76(0.79) T	0.44(0.44) T
영구자석 중량	169 g	309 g
극당 유효 자속	4.7 mWb	4.9 mWb
영구자석 중량 당 유효 자속 [mWb/kg]	27.6	15.9

* () 안의 수치는 식(2)에 의해 계산된 값이다.



(a) slotted type (b) Slotless type

그림 8 1상 여자시 자계 분포

Fig. 8 Magnetic field distribution with one phase excited

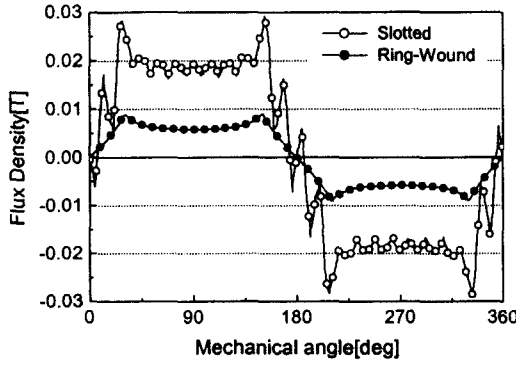


그림 9 1상 여자시 공극 자속밀도 분포
Fig. 9 Airgap flux density distribution with one phase excited

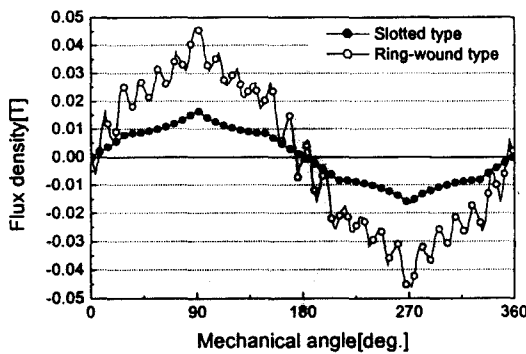


그림 10 3상 여자시 공극자속밀도 분포
Fig. 10 Airgap flux density distribution with three phase excited

3.3 자기 및 상호 인덕턴스 특성

고속 영구자석형 브러시리스 기기의 구동시스템에서는 권선의 자기 인덕턴스와 상호 인덕턴스는 동특성에 매우 중요한 영향을 미치는데, 자기 인덕턴스가 클 경우에는 이상적인 토크-속도 곡선을 심하게 왜형시키며 작을 경우에는 PWM 구동에 의한 전류 리플을 증가시켜 손실과 토크 리플을 증가시킨다[5,6]. 표 4는 두 모델의 상권선 자기/상호 인덕턴스를 비교한 것으로 유한요소해석과 이론적 해석치를 나타낸 것이다[5,10]. 두 모델 모두 3.2절에서 진술하였듯이 전기자 권선의 관점에서 큰 자기저항 경로를 가지므로 권선 인덕턴스는 유도기나 릴럭턴스 기기에 비해 상대적으로 작은 값을 갖는다. 또한 표에서 괄호안에 있는 값은 2차원 유한요소 해석 결과로서 이론적 해석치보다 비교적 작은 값을 갖는데 이는 권선 끝 부분에 의한 인덕턴스를 고려하지 않았기 때문이다 [4,17].

4. 유기 전압과 발생 토크, 손실 및 효율

4.1 유기 전압과 발생 토크

슬롯형과 슬롯리스형 모두 정현적인 반경방향 공극자속밀도 분포를 가지므로 상권선에서 발생하는 유기전압 파형 역시 정현적이며, 그 실효치는 식 (6)에 의해 계산된다. 또한 모두 정현과 기기(Sinewave PM machine)이므로 전동모드시

정현과 전류 구동이 적합하며 발생 토크는 식 (8)에 의해 맥동이 없는 일정한 토크를 얻는다. 표 5는 두 모델의 단위 스택길이 당 발전 전압 및 토크, 중량 당 발전 전압 및 토크를 보여준다. 단위길이 당 발전전압과 토크는 슬롯형이 크지만, 단위 중량당 발전전압과 토크는 슬롯리스형이 크다. 따라서 컴팩트화는 슬롯형이 유리하며 경량화 측면에서는 슬롯리스형이 다소 유리함을 알 수 있다.

4.2 손실과 효율

슬롯형과 슬롯리스형의 고정자는 성층 철심으로 구성되므로 고속 운전시 영구자석에 의한 교번 자속으로 철손이 발생한다. 따라서 철손을 최소화 하기 위하여 고주파용 0.1mm ST-100 규소강판을 적층하여 사용한다. ST-100 규소강판의 카탈로그에 의하면자속밀도 1.5T, 주파수 400Hz에서 21[W/kg]의 철손이 발생하므로 이를 통해 근사적으로 철손을 계산할 수 있다.

또한, 슬롯형 기기의 경우 공극자속밀도의 슬롯리플에 의하여 영구자석이나 금속성 슬리브에 와전류 손실을 발생시킨다. 이러한 회전자의 와전류 손실은 고속 구동시 매우 심각하며, 특히 EMB는 진공속에 전동발전기가 놓이므로 회전자의 열손실은 복사에 의해서만 냉각되므로 이를 예측하고 최소화하는 것이 가장 중요하다[2]. 따라서 본 논문에서는 금속성 슬리브를 사용할 경우 고속에서 손실이 크게 증가하므로 FRP 슬리브를 사용한다. 따라서 영구자석 회전자 와전류 손실은 식 (9)와 같이 구할 수 있다[4,8].

$$P_m = \frac{\pi^3}{450\rho} (BN)^2 r_m^3 l_a d K_s \quad [W] \quad (9)$$

여기서 $B[T]$ 는 자속밀도 변화의 유효값으로 유한요소해석에 의해 구할 수 있다. 또한 $N[rpm]$ 은 회전 속도, d 는 자석의 두께, K_s 는 와전류의 발생에 영향을 주는 인자를 고려한 계수이다. 실제 응용에서는 영구자석에서의 와전류 손실을

표 4 권선 인덕턴스와 저항의 비교

Table 4 Comparison of Winding Inductance and Resistance

항목\형태	슬롯형	슬롯리스형
R_a [mΩ]	48	87
L_a^* [μH]	175(162)	123(101)
M_a^* [μH]	-63(-47)	-44(-25)

* ()안의 수치는 2차원 FEM 해석에 의한 것으로 이론치와 달리 권선 끝 부분에 의한 인덕턴스가 고려되지 않았다.

표 5 단위 스택길이/중량 당 유기전압 및 발생 토크

Table 5 Induced voltage and torque per unit stack length and weight

항목\형태	슬롯형	슬롯리스형
E_t/l_a [V/m]	2820	2190
T/l_a [Nm/m]	7.85	6.07
E_t/G [V/kg]	125	132
T/G [Nm/kg]	0.35	0.37

감소시키기 위해 절연된 여러 개의 링으로 분할하여 회전자를 구성하기도 한다[4].

한편, 효율은 식 (10)과 같이 계산된다.

$$\eta = \frac{P_o}{P_o + P_l} \times 100 \quad [\%] \quad (10)$$

여기서 P_o 는 전동 모드와 발전 모드에서의 출력이며, P_l 는 총 손실이다. EMB의 경우 진공 챔버와 자기베어링을 사용하므로 풍손과 마찰손이 없으며 자기베어링에서의 손실은 없다고 가정한다. 따라서 총 손실은 고정자 철손과 회전자 와전류손, 전동기에서의 동손만을 고려한다. 표 6은 두 모델의 손실과 효율을 나타낸 것으로 슬롯리스형은 동손이 비교적 크지만 회전자의 와전류손이 거의 없으므로 전체 효율에서는 97.5%로 91.8%인 슬롯형보다 6.2%가 더 높다.

5. 특성 비교 및 검토

그림 11은 슬롯형 영구자석 기기의 특성을 단위량으로 보고 슬롯리스 Ring-Wound형 기기와 여러 항목에 대해 비교한 것이다. 이를 비교 검토하면 다음과 같다.

- ① 슬롯형은 슬롯리스형보다 70%까지 축방향 길이가 더 짧게 설계되었다. 그러나 슬롯리스형의 경우 비중이 높은 철심 대신 비중이 낮은 영구자석을 많이 사용하므로 슬롯형에 비해 체적은 크지만 10%정도 가볍게 설계되었다.
- ② 슬롯리스형은 슬롯형에 비해 자기적 공극이 3.7배 크므로 영구자석 중량당 자속이 슬롯형의 60%정도이다. 따라서 영구자석의 이용률이 낮으며 전기장하가 비교적 큰 기기로 설계되었다.
- ③ 모두 동일 출력을 갖도록 설계되었으므로 기기의 길이당 또는 중량당 출력은 ①항에서 전술하였듯이 슬롯리스형이 슬롯형에 비해 길이당 출력은 80%, 중량당 출력은 110% 정도가 된다.
- ④ 동손의 경우 전기장하가 큰 슬롯리스형이 슬롯형에 비해 약 1.8배이상 크며 철손은 철심을 많이 사용한 슬롯형이 1.6배 정도 크다. 그러나 슬롯형의 경우 회전자의 와전류손실이 매우 크므로 전체적인 손실은 슬롯리스형의 3.4배 이상 발생하고 중량당 손실은 3.2배 이상 크다.

6. 결 론

플라이휠 에너지 저장 시스템의 전동발전기에 적용하기 위해 영구자석형 기기를 슬롯형과 슬롯이 없는 Ring-wound형 기기로 각각 모델링하여 유한요소해석과 이론적 해석에 의해 특성을 비교 검토하였다.

- 슬롯형은 슬롯리스형보다 더 짧게 설계·제작될 수 있으므로 EMB 시스템의 자기 베어링이나 센서와 같은 부속 장치들을 설치하기 위한 공간을 확보하기에 유리하다. 따라서 고밀도 출력이 가능하여 시스템의 콤팩트화를 이룰 수 있다. 그러나 철심을 많이 사용하므로 슬롯리스형에 비해서는 시스템의 경량화에는 다소 불리하다.
- EMB 시스템은 전동발전기가 진공속에 놓이므로 열손실

표 6 손실 및 효율 비교

Table 6 Comparison of Losses and Efficiency

항목 \ 형태	슬롯형	슬롯리스형
동손 [W]	6.8 (5.9)	12.2 (10.7)
철손* [W]	22.0	13.9
회전자 와전류손[W]	60.2	-
총 손실 [W]	89.0(88.1)	26.1(24.6)
효율 [%]	91.8(91.9)	97.5(97.6)
중량당 손실 [W/kg]	60.8(60.1)	19.1(18.0)

* 철손은 400Hz에서 계산된 수치이며, () 안의 수치는 발전 모드시 수치이다.

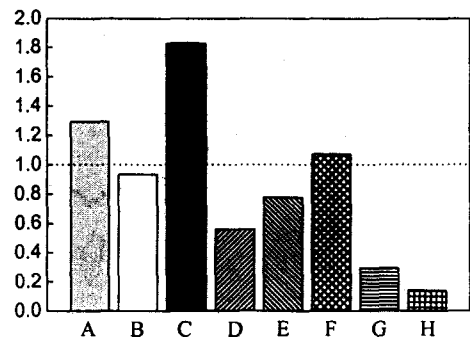


그림 11 슬롯형과 슬롯리스형 영구자석 브러시리스 기기의 특성 비교

- (A: machine length, B: machine weight, C: PM weight, D: flux per PM weight, E: output power per length, F: output power per weight, G: total losses, H: losses per wight)

Fig. 11 Comparison of Slotted and Slotless Ring-wound PM Brushless Machines

은 복사에 의해서만 냉각되므로 손실을 최소화해야 하며, 특히 토크가 영(零)이고 정격 속도에서 플라이휠에 에너지를 저장하고 있을 때 손실이 없어야 한다. 이는 고정자 철손과 회전자 와전류손실을 최소화함으로써 해결할 수 있다. 이러한 관점에서 슬롯형의 경우 슬롯리플에 의한 와전류 손실이 매우 크므로 플라이휠에 저장된 운동에너지를 크게 소모하게 된다. 이를 위해 실제로는 원통형 자석을 여러 개의 분할된 세그먼트 링으로 제작하고 이를 서로 절연시켜 회전자를 제작하게 된다. 본 모델의 영구자석형 회전자를 다섯 개의 분할된 자석을 사용할 경우 전동모드에서 98.3%, 발전모드에서는 96.7%까지 효율을 증가시킬 수 있다.

- 슬롯리스형 Ring-wound형의 경우, 슬롯형 기기에서 심각한 회전자 손실을 크게 줄일 수 있다. 더욱이 슬롯형은 슬롯리플을 줄이기 위해 작은 슬롯 개구부를 갖기 때문에 고정자 제작, 특히 권선 작업에 어려움이 발생한다. 이에 반해 Ring-wound형은 링 형태의 고정자를 갖기 때문에 구조적으로 매우 간단해 제작이 쉽고, 아몰퍼스 등의 합금을 사용한 제작이 가능하다.

EMB 시스템은 저장되는 에너지의 손실이 적어야 하고 전 기자동차, 하이브리드 전기자동차의 보조동력원, 컴퓨터용 UPS와 같은 EMB의 응용분야를 고려할 때 전동발전기의 소형화, 경량화, 고효율화 및 고출력화가 요구된다. 그러므로 소형화와 고출력화가 요구되고 짧은 시간동안 에너지를 저장하는 시스템에서는 슬롯형이 유리하며, 고효율화와 경량화가 요구되고 긴 시간동안 에너지를 저장하는 시스템에서는 슬롯리스 Ring-wound형 기기가 더 적합하다고 사료된다.

7. 부 록

슬롯형과 슬롯리스형 영구자석 브러시리스 전동발전기의 설계 사양

7.1 슬롯형 기기

고정자 외반경 (r_o)	34.0 mm
고정자 내반경 (r_i)	16.5 mm
스택 길이 (l_a)	65.0 mm
요크 두께	8.1 mm
슬롯수	24
치폭	2.2 mm
슬롯 높이	8.6 mm
치 shoe의 높이	0.8 mm
슬롯 개구폭	1.5 mm
자기적 공극길이 (g)	2.0 mm
회전자 외반경	15.5 mm
영구자석 외반경 (r_m)	14.5 mm
축반경 (r_{sh})	10.0 mm

7.2 슬롯리스 Ring-wound형 기기

고정자 외반경 (r_o)	34.0 mm
고정자 철심 외반경 (r_s)	29.6 mm
고정자 철심 내반경 (r_i)	23.4 mm
권선 내반경 (r_w)	19.0 mm
스택 길이 (l_a)	84.0 mm
요크 두께	6.2 mm
자기적 공극길이 (g)	7.4 mm
회전자 외반경	17.0 mm
영구자석 외반경 (r_m)	16.0 mm
축 반경 (r_{sh})	10.0 mm

참 고 문 헌

[1] R.F.Post et al, "Electro-mechanical Battery Research and Development L.L at the Nat'l Lab.", 26th International Symposium on Automotive Technology and Automation, Achen, Germany, Sept.13-17, 1993

[2] H. Hofmann, S.R.Sanders. " Synchronous reluctance motor/alternator for flywheel energy storage systems" , in IEEE workshop on Power Electronics in Transportation, October 24-25, 1996, Dearborn, Mich. pp. 199-206

[3] P.P. Acarnley, B.C. Mecrow, J.S. Burdess, J.N. Fawcett, J.G.Kelly, and P.G. Dickinson, "Design principles for a flywheel energy store for road vehicles", In Conference Record of the 30th IAS Annual Meeting, pp. 672-678, 1995.

[4] J.R. Hendershot Jr. The Miller, "Design of brushless permanent-magnet motors," Oxford, 1994

[5] Z.Q. Zhu, K.Ng, and D. Howe, "Design and analysis of high-speed brushless permanent magnet motors", Eight International Conference of Electrical Machines and Drives, pp381-385, September, 1997

[6] Kais Atallah, Zi Qiang Zhu, David Howe, Terry S. Birch, "Armature reaction field and winding inductances of slotless permanent-magnet brushless machines," IEEE Trans. Magn., vol. 34, no.5, pp. 3737-3744, 1998

[7] D.E Hesmondhalgh, MSc, PhD, CEng, MIEE, D. Tipping, BA, BSc, Phd, M. Amrani, MSc, "Design and construction of a high-speed high-performance direct-drive handpiece", IEE Proceedings, Vol. 134, No.6 Nov. 1987

[8] Isao Takahashi, Takehisa Koganezawa, Guijia Su, "A super high speed PM motor drive system by a quasi-current source inverter", IEEE Tran. on IAS, Vol. 30, No. 3, May/June 1994

[9] H.Polinder, M.J. Hoeijmakers, "Eddy-current losses in the permanent magnets of a PM machine," Eight International Conference of Electrical Machines and Drives, pp138-142, September, 1997

[10] S M Abu Sharkh, M R Harris, N Taghizadeh Irenji, "Calculation of rotor eddy-current loss in high-speed PM alternators," Eight International Conference of Electrical Machines and Drives, ppl70-174, September, 1997

[11] J.A. Haylock, B.C. Mecrow, A.G Jack, D.J. Atkinson, "Operation of a fault tolerant PM drive for an aerospace fuel pump application," Eight International Conference of Electrical Machines and Drives, pp133-137, September, 1997

[12] T.Fukao, "Principles and output characteristics of super high speed reluctance generator systems", IEEE Trans. IAS, Vol. 22, 1986

[13] B.T. Merritt, R.F. Post, G.R. Dreifuerst, D.A. Bender, "Halbach Array Motor/Generators-A Novel Generalized Electric Machine", Lawrence Berkeley Laboratory, Univ. of California, Berkeley, CA, 94720, Feb.1995

[14] 장석명, 서진호, 정상섭, 최상규, "영구자석 Halbach

배열을 이용한 초고속 모터용 계자시스템의 구성과 특성 해석”, 대한전기학회 제48B권 제4호 pp152, 1999

[15] 장석명, 서진호, 정상섭, 최상규, 함상용, “전기기계식 배터리 시스템용 초고속 전동발전기의 설계, 제작 및 모드별 특성”, 대한전기학회 제48B권 제8호 pp400-407, 1999

[16] Lawrence W. Langley, Robert L. Fisher, “Toroidally wound brushless DC motor,” U.S. PATENT, Patent number 4547713, Oct. 15, 1985

[17] Entrico Levi, “Polyphase motors”, JOHN WILEY & SONS, 1984

저 자 소 개



장석명 (張錫明)
 1949년 7월 3일 생, 1976년 한양대 전기공학과 졸업, 1978년 동 대학원 졸업, 1986년 한양대 대학원 박사과정 졸업 (공학), 1989년 미국 Univ. of Kentucky(Post-doc), 1978년~현재 충남대 전기공학과 교수, 현재 당학회 평의원, 편집이사, 편집위원장, 전기기기 및 에너지 변환 시스템 부문회 부회장 및 편집위원장
 Tel : 042-821-5658
 E-mail : smjang@ee.cnu.ac.kr



류동완 (柳東完)
 1976년 3월 9일 생. 1999년 충남대학교 전기공학과 졸업, 2001년 동 대학원 석사 과정 졸업(석사), 현재 EMBEST (주) 연구부에 근무.
 Tel : 02-869-6842
 E-mail : jaguar@embest.com



정상섭 (鄭相燮)
 1971년 1월 29일 생, 1996년 충남대학교 전기공학과 졸업, 1998년 동 대학원 졸업, 2001년 동 대학원 박사과정 수료
 Tel : 042-821-7608
 E-mail : sangsub@ee.cnu.ac.kr



최상규 (崔相奎)
 1961년 1월 28일 생, 1983년 한양대 기계공학과 졸업, 1988년 Texas A&M University 석사 졸업, 동 대학원 박사 졸업(공학), 1993년~현재 한국기계연구원 재직, 관심분야 : 회전체 역학, 초고속 전동발전기, 가스베어링, 자기베어링
 Tel : 042-868-7351
 E-mail : skchoi@mailgw.kimm.re.kr