

전자기력을 고려한 플라이휠 에너지 저장시스템용 전동발전기 구조해석

고우식[†]·류동완*·오시덕*·성태현**·한상철**·한영희**

Structural Analysis considering Electromagnetic Force on Motor/Generator for Flywheel Energy Storage System

W.S.Ko, D.W.Ryu, S.D.Oh

Key Words: Electromagnetic force(전자기력), Flywheel Energy Storage System(플라이휠 에너지 저장시스템), Motor/Generator(전동발전기)

Abstract

Flywheel Energy Storage System(FESS) consists of a high speed flywheel with an integral motor/generator suspended on non contact bearings and in an evacuated housing. Permanent magnet machines as the FESS motor/generator are a popular choice, since there are no excitation losses which means substantial increase in the efficiency. In this paper, the structural design method of rotor retainer for a high speed motor/generator are presented.

1. 서 론

에너지 저장시스템은 잉여의 에너지를 저장하였다가 에너지 소모가 클 때 이를 사용하는 것을 목적으로 한다. 기존의 대표적 전기에너지 저장장치인 화학전지는 짧은 수명과 낮은 단위질량당 에너지 저장밀도로 인해 대체 전기에너지 저장시스템이 요구되어 왔다. 플라이휠 에너지 저장시스템(FESS : Flywheel Energy Storage System)은 잉여의 에너지를 플라이휠의 회전관성에너지로 저장하였다가 필요시 회전관성에너지를 전기적 에너지로 변환하는 에너지 저장시스템으로서 화

학전지와 같이 소형화, 모듈화가 가능하면서도 반영구적인 수명과 높은 단위질량당 에너지 저장 밀도, 순시 충/방전의 가능 그리고 에너지 저장효율이 90% 이상인 고효율형의 무공해 장치이다.

플라이휠 에너지 저장시스템에서 가장 핵심이 되는 요소 중 하나는 회전체인 플라이휠을 구동하여 입력되는 전기에너지를 회전운동에너지 형태로 저장하였다가, 필요시에 전기에너지로 출력하는 전동발전기이다. 고밀도, 고효율의 플라이휠 에너지 저장시스템이 되기 위해서는 플라이휠뿐만 아니라 전동발전기도 운전속도가 수만 rpm까지 고속화가 가능해야 하며 손실에 의한 발열이 최소화된 회전자 구조를 가져야 한다. 이러한 요구조건을 만족하기 위해 회전자에 네오디움과 같은 고밀도의 영구자석을 사용함으로써 계자에 따른 손실이 없고 높은 효율을 얻을 수 있는 브러시리스 기기가 대부분의 플라이휠 에너지 저장시스템에 적용되고 있다.

회전자에서는 회전속도의 제곱에 비례하여 원심력이 작용하기 때문에 고속 회전시 네오디움

† (주)효성 중공업연구소

E-mail : kws@hyosung.com

TEL : (055)268-9923 FAX : (055)268-9928

* (주)효성 중공업연구소

** 한진전력연구원

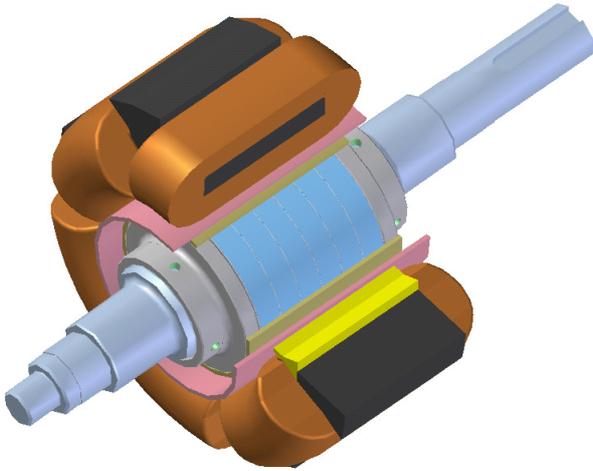


Fig. 1 Configuration of Motor/Generator

영구자석은 그 자체의 강도만으로는 자중에 의한 원심력을 견디지 못한다. 따라서 원심력에 의한 영구자석의 비산이나 이탈을 방지하기 위해 비자성체 또는 비금속 재료의 회전자 보강링을 부착한다. 기존의 연구에서는 이 보강링을 설계함에 있어 1)영구자석 자중에 의한 원심력과 2)회전자 보강링 자중에 의한 원심력의 영향만을 고려하였다. 그러나 자속밀도가 높은 영구자석을 적용할수록 회전자와 고정자 사이의 반경방향 자기흡인력이 증가하게 되므로 보강링 설계시 이에 대한 검토가 요구되는 바이다.

본 논문에서는 5kWh급 플라이휠 에너지 저장 시스템용 전동발전기를 대상으로 회전자 보강링의 설계를 위해 원심력에 의한 기계적 하중과 자기흡인력에 의한 전자기적 하중을 함께 고려하여 보강링의 구조강도 건전성을 평가하였다

2. 본 론

2.1 전동발전기 설계

FESS는 저장되는 에너지 손실이 적어야 하고 전기자동차의 보조동력원, 컴퓨터용 UPS와 같은 응용분야를 고려할 때 전동발전기의 소형화, 경량화, 고효율화 및 고출력화가 요구된다. 또한, 전동발전기가 비접촉식 베어링에 의해 진공상태에 놓여져 있기 때문에 회전자의 손실에 의해 발생한 열은 복사에 의해서만 냉각되므로 회전자 손실의 최소화가 요구된다. 특히, 전동발전기의 토크가 영(零)이면서 회전속도가 일정한 FESS의

Table 1 Design Requirements of Motor/Generator

항목	사양
FESS 저장에너지	5 [kWh]
유효운전속도	15,000~30,000 [rpm]
플라이휠 관성모멘트	5.6 [kg m ²]
가속시간	3,000 [sec]
전동발전기 용량	20[kW]
상수	3상
최대전류	29 [A]
입력단자전압	380 [V]

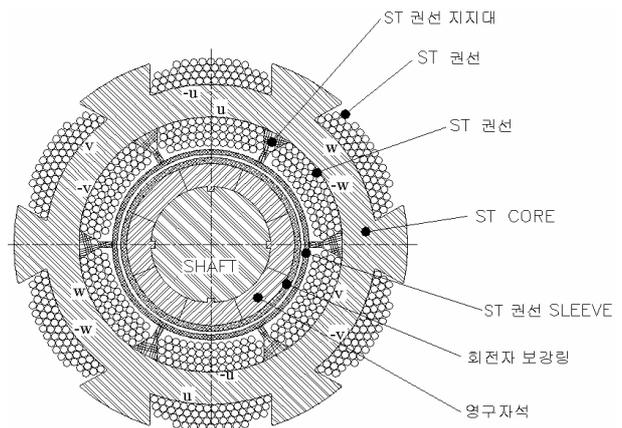


Fig. 2 Sectional Drawing of Motor/Generator

저장모드에서의 손실이 최소화 되어야 한다. 이는 고정자 철손과 회전자 와전류 손실을 최소화함으로써 해결할 수 있다. 이러한 관점에서 [1]에 제시된 슬롯형과 슬롯리스형의 전동발전기를 비교한 결과, 본 설계에서는 슬롯리스 Ring-wound 형의 모델을 선정하였다. 또한, 고속 회전에 의해 발생하는 원심력과 자기흡인력에 의한 영구자석의 반경방향 비산이나 이탈을 방지하기 위해 비자성체를 이용한 회전자 보강링을 부착하였다.

선정된 슬롯리스 Ring-wound형의 전동발전기 구조는 Fig 1과 같으며 영구자석의 감자조건, 장하분배법과 퍼미언스법을 이용하여 Table1의 설계요구사항을 만족시키도록 설계되었다. Fig 2와 Table 2는 설계된 전동발전기의 단면도와 설계 파라미터를 나타낸 것이다.

Table 2 Design Requirements of Motor/Generator

항 목	치 수	항 목	치 수
영구자석 /전기자길이	60[mm]	영구자석 내경	50[mm]
전기자 권선 내경	78[mm]	영구자석 외경	70[mm]
전기자 권선 외경	158[mm]	보강링 두께	2[mm]

2.2 전동발전기 회전자 보강링 구조해석

FESS는 일반적으로 에너지 저장밀도를 높이기 위해 수만 rpm에 달하는 고속회전을 해야 한다. 본 연구에 적용된 네오디움 영구자석은 밀도가 7.4g/cm^3 으로 철과 비슷한 반면 기계적 강도는 80MPa 로서 상대적으로 취약하기 때문에 고속회전에 따른 원심력만을 고려하더라도 영구자석 자체의 강도로는 이 힘을 견디지 못한다. 따라서, 전동발전기 설계시 영구자석의 이탈방지를 위해 회전자 보강링을 채택하였으며, 영구자석이 원하지 않는 형태로 파괴되는 것을 막기 위해 Fig 2와 같이 반경방향으로 8등분하여 조립이 되도록 설계를 하였다.

전동발전기 회전자 보강링 강도계산을 위해 원심력과 자기흡인력을 하중으로 고려하였다. 원심력은 다시 회전자 내부에 부착된 영구자석의 원심력에 의한 압력효과와 보강링 자중에 의한 원심력으로 구분할 수 있고 자기흡입력은 영구자석의 자계에 의해 발생하는 힘으로서 영구자석과 고정자 철심사이에 인력으로 작용한다.

본 연구에서는 회전체 보강링의 설계를 위해 Stainless와 Titanium의 두 가지 재료를 검토하였다. Table 3에 이 재료들에 대한 물성치를 나타내었다.

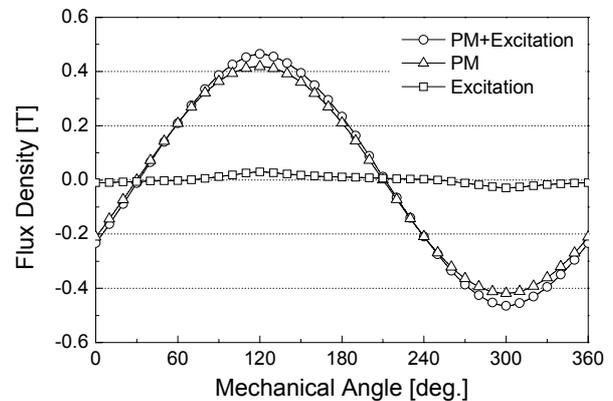
영구자석에 의한 원심력 효과는 다음과 같다.[4]

$$P = \frac{\rho_m \cdot \omega^2 (r_o^3 - r_i^3)}{3r_o} \quad (1)$$

여기서, r_o, r_i, ρ_m, ω 는 영구자석의 내경, 외경, 밀도 그리고 회전각속도를 나타낸다.

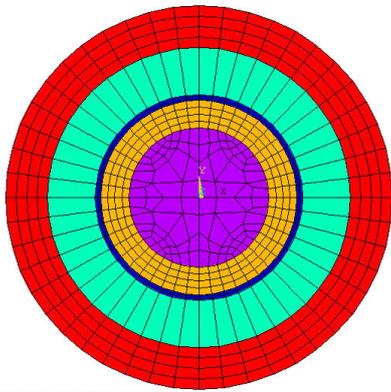
Table 3 Mechanical Properties of Stainless and Titanium

	Stainless	Titanium
Density	8 g/cm ²	4.48 g/cm ²
Yield Strength	205 MPa	824 MPa
Tensile Strength	520 MPa	892 MPa
프와송 비	0.3	0.34
탄성계수(E)	193 GPa	110 GPa

**Fig 3** Flux Density of Motor/Genetator

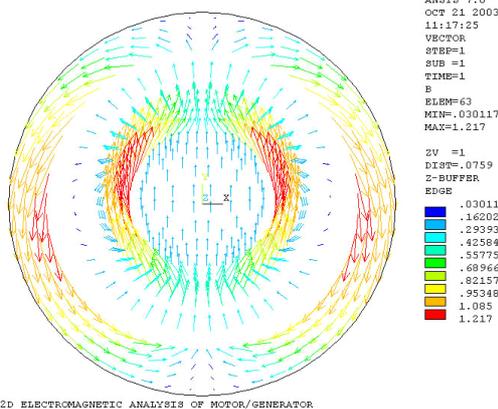
전자기 흡인력은 자속밀도에 비례한다. Fig 3에서 보는 바와 같이 영구자석 자체에 의한 자속밀도와 고정자 권선에 정격전류가 흐를 경우 자속밀도가 크게 차이 나지 않음을 알 수 있다. 따라서 본 연구에서는 해석의 편리성을 위해 영구자석에 의한 정자계 해석을 통해 자기흡인력을 산출하였다.

보강링의 구조해석은 적용되는 하중이 기계적 하중과 전기적 하중이 동시에 적용되어야 하기 때문에 ANSYS/Emag를 사용하여 수행하였다. Fig 4는 전동발전기의 2D 유한요소모델로서 원심력만을 고려할 경우 최대칭으로 모델링 할 수 있으나 2극 영구자석에 의한 자기흡인력 계산을 위해 2D로 모델링을 하였다. Fig 5와 6은 각각 영구자석에 의한 자속밀도와 자기흡인력을 나타낸다. Fig 6에서 보는 바와 같이 자기흡인력은 영구자석의 N극과 S극에서 최대값을 가진다



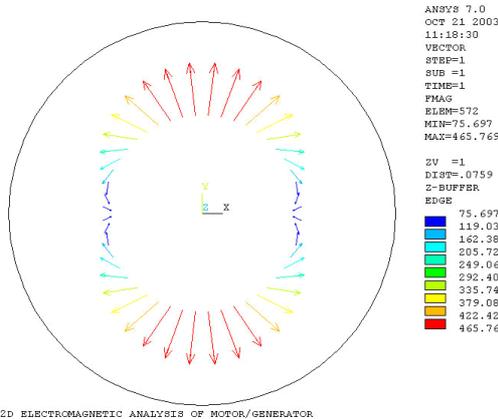
2D ELECTROMAGNETIC ANALYSIS OF MOTOR/GENERATOR

Fig 4 2D FE Model of Motor/Generator



2D ELECTROMAGNETIC ANALYSIS OF MOTOR/GENERATOR

Fig 5 Distribution of Flux Density



2D ELECTROMAGNETIC ANALYSIS OF MOTOR/GENERATOR

Fig 6 Electromagnetic Force at Rotor

Fig 7, 8, 9에는 회전자가 15,000rpm으로 회전할 때 Stainless 보강링에 발생하는 응력을 원심력만 고려할 경우, 자기흡인력만 고려할 경우, 원심력

과 자기흡인력을 동시에 고려할 경우에 대해 나타내었다.

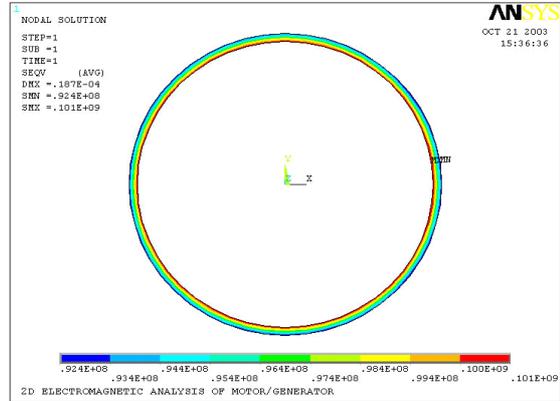


Fig 7 Stress Distribution of Stainless Retainer by Centrifugal Force @15,000rpm

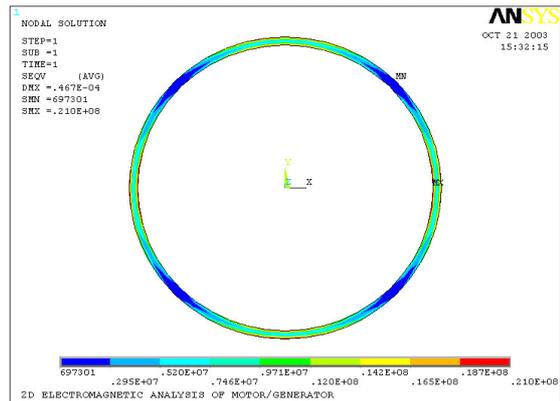


Fig 8 Stress Distribution of Stainless Retainer by Electromagnetic Force @15,000rpm

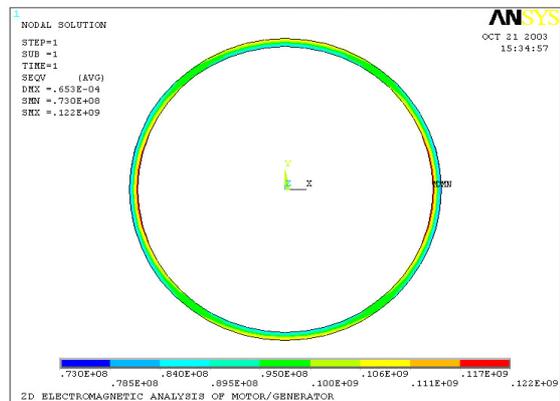


Fig 9 Stress Distribution of Stainless Retainer by Centrifugal and Electromagnetic Forces @15,000rpm

Table 4 Max. Stress and Displacement of Retainer

A. Stainless				
	@15,000rpm		@30,000rpm	
	최대응력	최대변위	최대응력	최대변위
원심력	101MPa	0.019mm	409MPa	0.075mm
자기력	21MPa	0.047mm	21MPa	0.047mm
원심력+자기력	122MPa	0.065mm	430MPa	0.122mm
B. Titanium				
	@15,000rpm		@30,000rpm	
	최대응력	최대변위	최대응력	최대변위
원심력	91MPa	0.029mm	365MPa	0.12mm
자기력	21MPa	0.080mm	21MPa	0.080mm
원심력+자기력	111MPa	0.108mm	386MPa	0.20mm

Table 5 Strength Margin of Retainer

	Stainless	Titanium	비고
허용응력	204 MPa	687MPa	안전율 1.2
최대응력	430 MPa	386MPa	-
Margin	0.47	1.8	1이상 안전

Table 4에 Stainless와 Titanium 보강링에 대한 하중별 최대응력과 최대변위를 15,000rpm과 30,000rpm에 대해 정리하였다. Stainless 보강링의 경우 운전속도 15,000rpm에서는 자기흡인력에 의한 응력이 원심력에 의한 응력의 약 20% 정도로 높다가 운전속도 30,000rpm에서는 5% 전후로 낮아짐을 알 수 있다. 이는 자기흡인력의 경우 영구자석의 자속밀도에 비례하기 때문에 운전속도에 관계없이 일정한 반면, 원심력은 운전속도의 제곱에 비례하기 때문이다.

이러한 결과를 고려할 때 비록 본 연구에서 설계한 전동발전기 모델에서는 자기흡인력이 회전자 보강링에 발생하는 응력에 기여하는 바가 적지만 본 연구에서 설계된 모델보다 영구자석 외경과 고정자 내경이 가까운 경우, 즉 자기흡인력이 더 높은 경우, 또는 최고운전속도가 30,000rpm보다 다소 낮

은 경우에는 회전자 보강링 강도 검토시 자기흡인력을 고려해야 할 것으로 판단된다.

Table 5에는 각 재질 적용에 따른 발생 최대응력을 허용응력과 비교하였다. 허용응력은 Stainless와 Titanium의 항복응력을 안전율 1.2로 나누어준 값이며, Margin은 허용응력을 최대응력으로 나누어준 값이다. Margin 검토 결과 전동발전기가 영구자석의 이탈 없이 30,000rpm에서 운전되기 위해서는 회전자 보강링에 2mm 두께의 Titanium을 적용해야 함을 알 수 있다.

3. 결 론

본 연구에서는 FESS 전동발전기 회전자 보강링의 설계시 전자기 흡인력의 영향을 평가하기 위해 원심력과 전자기 흡인력을 고려하여 수치해석을 실시함으로써 다음과 같은 결론을 얻었다.

(1) 원심력과 전자기 흡인력을 함께 고려할 경우 회전자 보강링의 최대응력은 원심력만 고려할 경우에 비해 Stainless 소재인 경우 15,000rpm에서는 21%, 30,000rpm에서는 5%, Titanium 소재인 경우 15,000rpm에서는 22%, 30,000rpm에서는 5.8% 증가하였다.

(2) 회전자 보강링의 재질은 밀도가 낮고 강도가 높은 Titanium이 Stainless보다 우수한 것으로 나타났다.

후 기

본 연구는 산업자원부에서 시행한 전력산업연구개발사업의 지원에 의하여 수행된 연구결과입니다.

참고문헌

- (1) R. F. Post et al, Sep.13-17, 1993, "Electro-mechanical battery research and development L.L at the Nat'l Lab." 26th International Symposium on Automotive Technology and Automation, Germany

- (2) S.M.Hang, H.W.Cho, S.H.Lee, D.W.Ryu, Jul. 21-23, 2003, "Design and Analysis of High Speed Motor/Generator for 5kWh Flywheel Energy Storage System", Proceeding of the KIEE Summer Annual Conference 2003, Vol B, pp.1051-1053
- (3) Sang Kyu Choi, Young Cheol Kimm, Jin-ho Kyubg, 1998, "Rotordynamic Design and Analysis of the Rotor-Bearing System of 500Wh Flywheel Energy Storage Device", Korean Society for Noise and Vibration Engineering, Vol 8, pp. 81~86
- (4) Ansel C. Ugural, Saul K. Fenster, 1995, "ADVANCED STRENGTH AND APPLIED ELASTICITY, Third Edition" , pp.327-362