

플라이휠 에너지 저장 시스템용 Ring-Wound형 초고속 전동발전기의 설계 및 특성

장석명* 류동완** 양현섭* 정상섭* 최상규** 함상용**
*충남대학교 전기공학과 **한국기계연구원

Design and Characteristics of High-Speed Motor/Generator with Ring Wound Stator for the Flywheel Energy Storage System

S.M. Jang* D.W. Ryu* H.S. Yang* S.S. Jeong* S.K. Choi** S.Y. Ham**
*Chung-Nam Nat'l Univ. **KIMM

Abstract - This paper treated the design and characteristics of high speed motor/generator with ring wound stator for the flywheel energy storage system. The most important advantages of the ring-wound motor is the slotless stator, i.e. no cogging torque, no space harmonic of air-gap flux density, etc. Because of these advantages, ring wound type motor is suitable to operate at the high speed.

표 1 전동발전기의 설계 요구사항

항목	사항	항목	사항
최대 속도	60,000[rpm]	가속시간	1800[sec]
용량	6[kW]	상수	3
저장 에너지	300[Wh]	최대 전류	20[A]
관성 모멘트	0.09[kg · m ²]	입력단자전압	220[V]

1. 서론

플라이휠 에너지 저장 시스템(Flywheel Energy Storage System; 이하 FESS)은 기계적 에너지 저장 방식의 일종으로 화학전지와 같이 소형화, 모듈화가 가능하여 흔히 기계전지(Electro-mechanical Battery)라고 불린다. FESS는 잉여 전기에너지를 플라이휠의 회전 운동에너지로 변환시켜 저장하고 필요시 운동에너지를 전기에너지로 출력하는 장치로서 많은 양의 에너지를 저장하기 위해 초고속으로 회전해야 한다. 수만 rpm 이상의 초고속으로 회전하는 모터는 동일 출력의 범용 저속 모터에 비해 자성체의 체적이 매우 작아져 소형, 경량화가 가능하다.

본 논문에서는 FESS에 응용하고자 전동발전기의 길이를 최소화시키면서 최대의 발전전압과 토크를 얻기 위해 Ring-Wound형을 선정하였다. Ring-wound형 전동발전기는 고정자 요크에 권선을 환상형으로 감고, 회전자는 영구 자석을 사용한다. 따라서 슬롯이 존재하지 않고 공극자속밀도가 정현적인 분포를 가지므로 코깅 토크에 의한 진동과 슬롯 리플이 존재하지 않아 고조파에 의한 손실이 존재하지 않는다. 또한 짧은 end turn으로 축방향의 길이가 짧아져 소형화시키는데 적합하다. 따라서 Ring-Wound형 전동발전기의 전동 모드 및 발전 모드시 특성식을 확립하여 설계법을 확립하였으며 그 타당성을 검증하기 위해 유한요소 해석법을 수행하였다. 즉 3D 유한요소 해석법을 통해 축방향 자속의 누설과 fringing을 고려하는 보정계수를 산정함으로써 2D 해석 결과의 정확성을 확보하였다. 또한 제작을 완료하여 공극에서의 자계분포 및 유기전압 특성 등을 측정하여 발전기 모드시의 제반 특성을 검토하였다.

2. Ring-Wound형 전동발전기의 설계와 제작

2.1 요구사항

본 연구에서 제작하고자 하는 FESS는 용량 6kW, 저장에너지 300Wh급이다. FESS가 발전기 모드일 때, 60000[rpm]에서 발전하기 시작하여 3분 동안에 6kW의 부하에 60Hz, 220V의 정전압을 공급할 수 있도록 설계한다. 그리고 전동기 모드에서는 최대 동작속도인 60000[rpm]까지 1800[sec]이내에 가속되도록 설계한다.

2.2 설계 특성식

FESS용 Ring-Wound형 전동발전기의 영구자석 회전자는 그림 1과 같이 직경 방향으로 자화 되었으므로 공극에서의 자속밀도 분포는 정현파를 갖는다. 그리고 공극자속밀도 분포는 고정자에 슬롯이 존재하지 않으므로 공간고조파가 거의 존재하지 않는 정현파를 갖는다. 따라서 상권선에는 정현파 전압이 유기되며 실효치 E_g 는 식 (1)과 같다.

$$E_g = \omega_s \Psi_M \tag{1}$$

여기서, ω_s 는 전기적 동기각속도, Ψ_M 는 자석에 의한 기본파의 쇄교 자속의 실효치로 식 (2)와 같다.

$$\Psi_M = \frac{k_{wl} N_{ph} \Phi_M}{2\sqrt{2}} \tag{2}$$

여기서, $k_{wl} = k_d k_p$ 은 권선계수, N_{ph} 는 상당 턴수, Φ_M 은 자석에 의한 기본파 자속으로 식 (3)과 같다.

$$\Phi_M = \frac{2}{\pi} K B_m A_{pole} \tag{3}$$

여기서, K 는 축방향 고정자 끝단에서의 누설과 fringing을 고려한 계수로써 3차원 유한요소 해석법을 통해 얻어진다. 그리고 B_m 은 공극자속밀도 분포의 최대치, A_{pole} 는 한 극의 공극면적으로 식(4)와 같다.

$$A_{pole} = \frac{2\pi}{p} R_s L \tag{4}$$

여기서, R_s 는 고정자 내부 반경, L 은 모터의 축방향 길이이다. 그리고 공극에서의 자속밀도의 최대치 B_m 은 식 (5)와 같다.

$$B_m = \frac{B_r \left[1 - \frac{R_r^2}{R_s^2} \right] \left[\frac{R_m^2 + \frac{R_r^2}{\gamma^2}}{R_s^2} \right] \sin \theta}{\left[1 + \frac{R_m^2}{R_s^2} \right] \left[1 - \frac{R_r^2}{R_m^2} \right] + \mu_r \left[1 - \frac{R_m^2}{R_s^2} \right] \left[1 + \frac{R_r^2}{R_m^2} \right]} \tag{5}$$

여기서, B_r 과 μ_r 은 영구자석의 잔류자속밀도와 상대 recoil 투자율이며, R_s , R_m 과 R_r 은 각각 고정자의 내반경, 회전자의 반경, 축의 반경이다. 또한, 전동모드에서의 토크는 식 (6)과 같이 주어진다.

$$T_{ph} = T_u + T_v = 2T_u = 2\left(KA \frac{N_u}{2} B_0 J_u\right) \quad (6)$$

그림 1과 같은 전동발전기의 설계 모델에서 각 파라미터를 결정하는 수순은 그림 2와 같으며 이러한 수순에 의해 결정된 파라미터는 표 2와 같다.

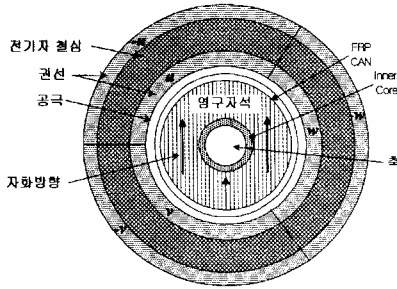


그림 1 Ring-Wound형 전동발전기의 설계 모델

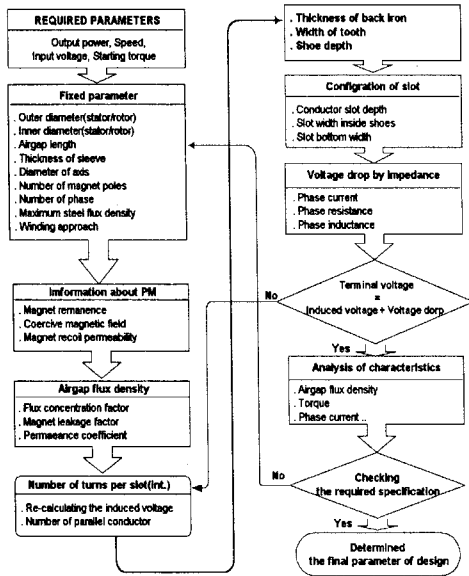


그림 2 전동발전기의 설계흐름도

표 2 Ring-Wound형 전동발전기의 설계 파라미터

항목	치수	항목	치수
내부자속밀도	0.5[T]	Can 두께	2[mm]
영구자석	40[mm]	전기자	40[mm]
축방향 길이	37[mm]	축방향 길이	40[mm]
전기자	37[mm]	전기자	9.5[mm]
권선 내경	81[mm]	철심 두께	2[mm]
전기자	1.5[mm]	내부	2.5[mm]
권선 외경	84	철심 두께	0.8[Ω]
기계적 공극	1.15[mH]	자기적 공극	20[A]
상당 권선수		상당 저항	
상당 인덕턴스		상당 인가전류	

2.3 제작

전동발전기의 제작도는 그림 3과 같으며 회전자는 직

경방향으로 자화된 10개의 분할된 영구자석을 FRP로 둘러쌌다. 그리고 영구자석이 자기베어링에 미치는 영향을 최소화하기 위해 축을 비자성체로 사용해야 하므로 영구자석의 기차력 강하가 발생한다. 따라서 공극자속 밀도를 증가시키기 위해 회전자의 영구자석 안쪽, 즉 축의 바깥쪽에 링형 철심을 삽입하였다. 그리고 고정자에 감긴 전기자 권선은 그림 4와 같이 환상형으로 감긴다.

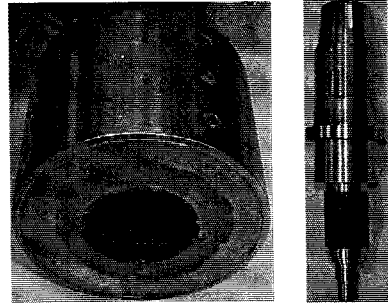


그림 3. 전기자(左) 및 계자(右)의 제작도

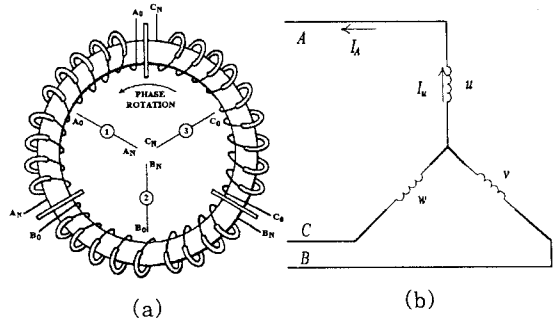


그림 4 (a) Ring-Wound형 고정자 및 (b) 전기자 권선 결선도

3. 전동발전기의 자계 분포 및 유기전압 특성

3.1 공극자속밀도 특성

전동발전기의 계자에 사용한 영구자석은 네오디움 계열의 NdFeB로 잔류자속밀도 $B_r = 1.17$ [Wb/m²], 보자력 $H_c = -10,800$ [Oe]의 값을 가진다. 공극자속밀도의 증가를 위해 영구자석 안쪽에 링형 철심을 사용하여 영구자석의 두께는 얇아 졌지만 그림 5와 같이 링형 철심이 없는 경우보다 0.1[T] 이상 공극자속밀도의 증가를 보였다. 따라서 전동발전기의 성능을 향상시킬 수 있다. 또한 그림 5, 그림 6과 같이 매우 정현적인 자속 밀도 분포를 보임을 알 수 있다. 그림 7에 자속밀도 분포의 전체적 특성을 보이고 있다.

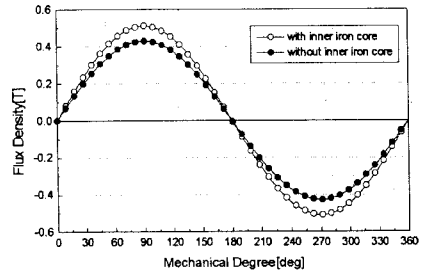


그림 5 내부 철심 유무에 따른 반경방향 기본파 공극자속밀도

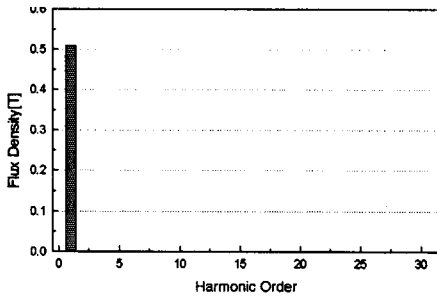


그림 6 공극자속밀도의 고조파 분석

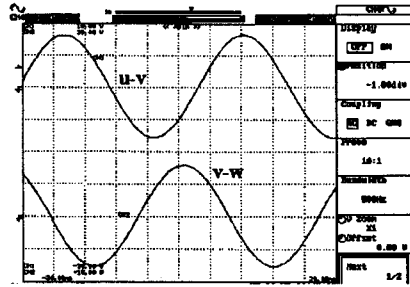


그림 9 u-v, v-w의 유기전압 파형

그림 10은 발전기 모드에서 선간에 발생하는 유기전압의 실효치를 회전속도에 따라서 나타낸 것이다. 2D FEM의 정확성을 향상시키기 위해 수행한 3D FEM에서 얻어지는 보정계수를 고려한 해석 결과와 측정값이 비슷함을 알 수 있다.

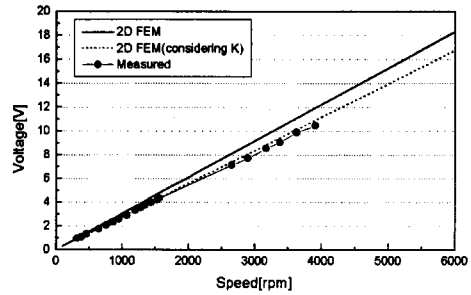


그림 10 발전모드시 선간전압 특성곡선

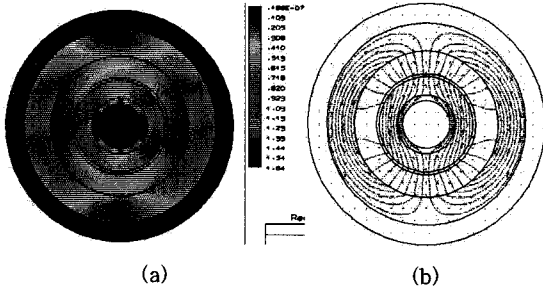


그림 7 Ring-Wound형 전동 발전기의 계자 특성
(a) 자속밀도분포 (b) 자속분포

축방향 길이에 따른 자속의 누설과 fringing 정도를 확인하여 FEM 해석을 위한 공극자속밀도의 보정계수를 산출하기 위해 3차원 정자계 해석을 했다. 그 결과는 그림 8과 같으며 축방향의 아래와 위 끝단 부분에서 다소 자속밀도 값이 감소하게 된다.

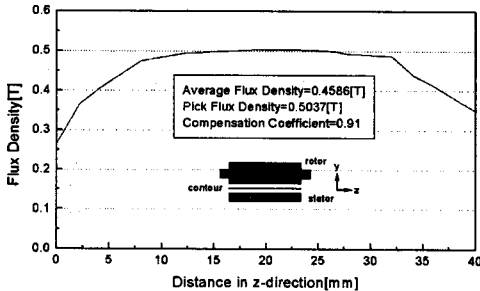


그림 8 축방향 길이에 따른 최대자속밀도 분포

3.2 발전모드시 유기전압 특성

발전기 모드에서의 유기전압은 무부하시 매우 선형적인 특성을 가진다. 따라서 발전기모드에서 무부하시 유기되는 상전압의 최대치는 최대동작속도인 1kHz에서 160[V]의 전압이 유기 된다. 발전기 모드에서의 유기전압 특성을 파악하기 위해 u-v, v-w상에서의 파형을 측정하였다. 그 결과는 그림 9와 같다. 계자의 자속이 그림 5에서와 같이 매우 정현적인 분포를 보이기 때문에 유기전압 역시 매우 정현적인 파형이 된다.

4. 결 론

본 논문에서는 FESS에 사용되는 2극 60,000rpm급 초고속 Ring-Wound형 전동발전기의 설계 및 특성에 관한 연구를 수행하였다. 전동발전기의 발전모드 및 전동모드별 특성식을 유도하여 FESS에서 요구하는 설계 사양을 만족시킬 수 있도록 설계하였으며, 도출된 파라미터에 의해 시제품을 제작하였다. 또한 FEM 해석과 특성시험을 통해 자계 분포와 유기전압 등을 검토하였다. 하지만 FESS의 기계적인 문제로 인해 6,000rpm까지만 운전이 가능했으며 현재 연구가 수행중에 있다. 그러나 6,000rpm까지의 특성시험결과가 특성방정식 및 FEM해석에 의한 결과와 매우 일치하였기 때문에 전동발전기의 설계는 매우 타당하다는 결론을 얻었다.

본 연구는 한국전력공사(기초전력공학 공동연구소)의 연구과제 95-지-04의 일부와 통상산업부(에너지관리공단)의 R&D 본부 에너지 절약기술개발사업 R&D 보고서 1994-E-EL02-P-44의 결과이다.

[참 고 문 헌]

- [1] Z.Q.Zhu, K.Ng, D.Howe "Design and Analysis of high-speed brushless permanent magnet motors", EMD97, pp.381, 1997
- [2] J.R.Hendershot JR, TJE Miller, "Design of brushless permanent magnet motors", 1994