

5kWh급 플라이휠 에너지 저장장치용 초고속 전동발전기의 설계 및 특성해석

장석명, 조한욱, 이성호, 류동원\*  
충남대학교, (주)효성\*

Design and Analysis of High Speed Motor/Generator for 5kWh Flywheel Energy Storage System

S. M. Jang, H. W. Cho, S. H. Lee, D. W. Ryu\*  
Chungnam Nat'l Univ., Hyosung Cooperation\*

**Abstract** - Flywheel Energy Storage System (FESS) 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 FESS motor/generator are a popular choice, since there are no excitation losses which mean substantial increase in the efficiency. In this paper, the basic design and the steady-state performances of a permanent magnet synchronous high speed motor/generator for FESS are presented.

다른 자계 및 공극 자속밀도 특성을 해석하였다.

1. 서 론

플라이휠 에너지 저장시스템(FESS : Flywheel Energy Storage System)은 전기역학적인 에너지 저장 방식의 일종으로 화학전지와 같이 소형화, 모듈화가 가능한 전기-기계 시스템이다. FESS는 비접촉식 배어링, 복합재 등의 부속기술의 개발 및 발전에 힘입어 양수발전은 물론 화학전지와 비교해서도 에너지 저장효율이 매우 높으며, 순시 충방전이 가능하고 수명이 반영구적이다. 더구나 화학전지와는 다르게 저온에서 상대적으로 성능저하가 없다는 장점을 가진다. 따라서 입지절약형, 분산형, 저공해형, 기술집약형의 미래지향적 에너지 저장시스템으로 우주 및 항공산업이나 잠수함, 전기자동차 등과 같은 특수 첨단 분야에서의 필수 핵심요소로 그 활용범위가 확대되고 있다[1][2].

FESS에서 가장 핵심이 되는 요소 중 하나는 회전체인 플라이휠을 구동하여 입력되는 전기에너지를 회전운동에너지 형태로 저장하였다가, 필요시에는 전기에너지로 출력하는 전동발전기이다. 그런데 FESS가 고밀도 저장장치가 되기 위해서는 플라이휠 뿐만 아니라 전동발전기도 운전속도를 수만부터 수십만 rpm 정도까지 초고속화를 이루어야만 한다. 따라서 전동발전기는 초고속 구동에 따른 스트레스를 견딜 수 있는 회전자 형상을 가져야 한다. 특히 손실에 의한 발열이 최소화된 회전자를 가져야 하며 고효율, 저가의 제작 비용 등과 같은 특징이 요구된다. 따라서 계자에 따른 손실이 없으므로 높은 효율을 얻을 수 있고, NdFeB와 같은 고밀도의 영구자석을 사용함으로써 고효율 에너지를 얻을 수 있는 영구자석 브러시리스 기기가 대부분의 FESS에 응용되고 있다.

본 논문에서는 초고속 에너지 저장시스템인 내전형 FESS에 적용될 슬롯리스 Ring-wound형 기기를 설계하고 특성 해석 결과를 제시하였다. 설계 모델은 10kW 2극 30,000rpm급 발전기로 전동모드에서는 정격속도까지 플라이휠을 충분히 가속할 수 있는 토크를 발생시키도록 설계하였다. 또한 공간고조파를 최소로 하기 위해 직경방향으로 자화된 영구자석 회전자를 가지며 이에

2. FESS용 영구자석형 전동 발전기

2.1 모델의 선정 및 설계 조건

FESS는 저장되는 에너지손실이 적어야하고 전기자동차, 하이브리드 전기자동차의 보조동력원, 컴퓨터용 UPS와 같은 FESS의 응용분야를 고려할 때 전동발전기의 소형화, 경량화, 고효율화 및 고회전력화가 요구된다. 특히 FESS는 전동발전기가 비접촉식으로 진공속에 놓여 손실의해 발생된 열은 복사에 의해서만 냉각되므로 손실을 최소화 해야한다. 특히 토크가 영(零)이고 정격속도로 회전하면서 플라이휠에 에너지를 저장하고 있는 에너지 저장모드에서의 손실이 최소화 되어야한다. 이는 고정자 철손과 회전자 와전류 손실을 최소화함으로써 해결할 수 있다. 따라서, 본 설계에서는 슬롯형과 슬롯리스형의 전동발전기 비교 측면에서, 슬롯리스 Ring-wound형의 모델을 선정하였다[4]. 또한 고속 회전기에서는 회전자의 제곱에 비례하는 원심력이 회전체에 작용하여 상당한 기계적인 스트레스를 발생시킨다. 따라서, 회전자는 고속회전시 영구자석의 비산이나 이탈을 방지하고, 기계적 스트레스를 견디도록 견고한 구조가 되어야한다. 고속회전에서 영구자석 회전자의 기계적인 강도를 높이기 위해 비자성체 또는 비금속 재질의 슬리브를 부착하기도 하는데, 본 설계에서는 기계적 스트레스를 고려하여 영구자석에 원통형 슬리브를 부착한 형태를 선정하였다.

선정된 슬롯리스 Ring-wound형의 전동발전기 토폴로지는 그림 1과 같으며 전동발전기는 영구자석의 감자 조건, 장하분배법과 피미언스법을 이용하여 표 1의 설계 요구사항을 만족시키도록 설계되었으며, 전압방정식에 의해 특성을 분석 검토하였다.

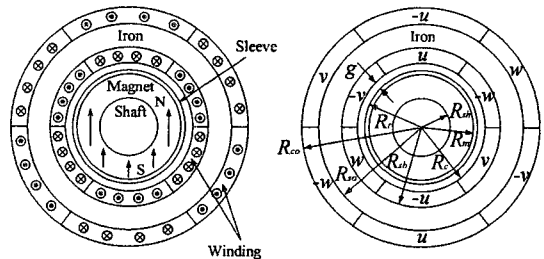


그림 1. 전동발전기 설계 모델

표 1 전동발전기의 설계 요구사항

항목	사양	항목	사양
최대 속도	30,000[rpm]	가속시간	3,000[sec]
용량	10[kW]	상수	3
저장 에너지	5[kWh]	최대 전류	29[A]
관성 모멘트	5.6[kg · m <sup>2</sup> ]	입력단자전압	380[V]

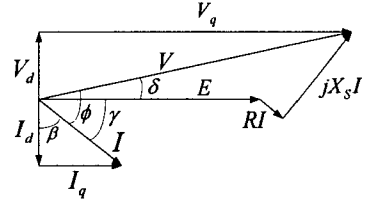


그림 2. 비돌극기 정현파 전동기의 페이저도

## 2.2 전동발전기의 특성 방정식

### 2.2.1 공극자속밀도

설계된 전동발전기는 직경방향으로 자화된 2극 영구 자석 회전자를 가지므로 공극에서의 반경방향 자속밀도는 정현적이다. 슬롯형의 경우 슬롯리플에 의한 공간조파가 존재하나 슬롯 리스형의 경우 기본파만 존재한다. 따라서 반경방향 공극자속밀도 분포의 기본파만 고려하면 식 (1)과 같이 표현된다.

$$B_r(\theta) = B_m \sin(\theta) \quad (1)$$

여기서  $\theta$ 는 전기각,  $B_m$ 은 유효공극에서의 반경방향 자속밀도의 최대값으로 식 (2)와 같다[3].

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

여기서  $B_{rem}$ 과  $\mu_r$ 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 반경이다.

### 2.2.2 유기전압 및 발생 토크

개방회로의 상당 유기전압의 실효값은 식 (3)과 같이 계산된다.

$$E = \omega_s \Psi_{M1} \quad (3)$$

여기서  $\omega_s$ 는 전기적 동기각속도,  $\Psi_{M1}$ 는 상당 자석에 의한 기본파 쇄교 자속의 실효치로 식 (4)와 같다.

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

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

$$\Phi_{M1} = \frac{2}{\pi} B_m A_{pole} \quad (5)$$

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

$$E = \sqrt{2} r_e l_a B_m k_{w1} N_{ph} \omega_s \quad (6)$$

여기서  $l_a$ 는 전동발전기의 축방향 유효길이이다.

한편, 해석모델은 정현파 유기전압 파형을 갖는 비돌극형 영구자석형 동기전동기이므로 그림 2와 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  $E$ 와 합하면 식 (7)과 같이 공급되는 단자 전압과 동일하다.

$$V = E + (R + jX_s)I \quad (7)$$

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

$$T_e = \frac{3}{\omega_m} E I \sin \gamma \quad (8)$$

여기서  $\omega_m$ 은 기계적 각속도,  $I$ 는 상전류 실효치,  $\gamma$ 는 유기전압과 전류와의 위상각이다.

그림 3은 플라이휠의 기계적 특성을 고려한 전동발전기 단면도를 나타내며, 표 2는 설계 파라미터를 나타낸다.

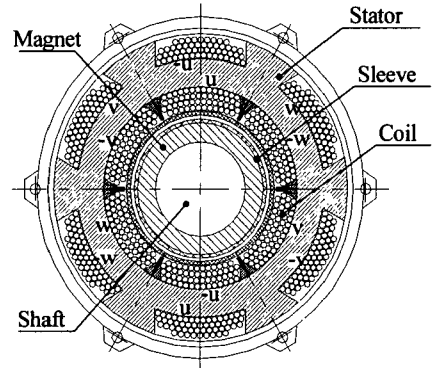


그림 3. 전동발전기 단면도

표 2 Ring-Wound형 전동발전기의 설계 파라미터

항목	치수	항목	치수
내부자속밀도	0.344 [T]	Can 두께	2 [mm]
영구자석 축방향 길이	60 [mm]	전기자 축방향 길이	60 [mm]
전기자 권선 내경	78 [mm]	전기자 철심 두께	15 [mm]
전기자 권선 외경	158 [mm]	기계적 공극	1 [mm]
자기적 공극	19 [mm]	상당 권선수	54 [turn]

## 2.3 특성해석

그림 4는 해석모델의 영구자석에 의한 자체특성과 비선형재료인 고정자 요크의 포화를 고려하기 위한 자속밀도 특성을 보여주고 있으며, 그림 5는 영구자석과 전기자 코일에 의한 공극 자속밀도 특성을 보여준다. 영구자석에 의한 공극 자속밀도가 정현적임을 알 수 있다.

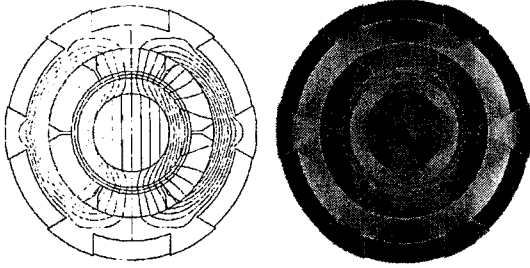


그림 4. 영구자석에 의한 자계특성

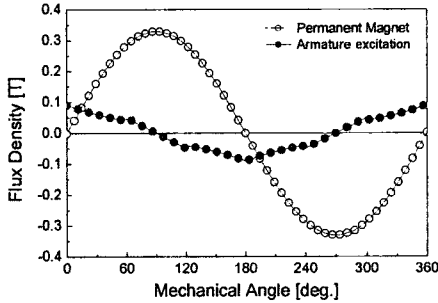


그림 5. 공극 자속밀도 특성

그림 6은 최대속도에서 발생되는 상간 유기전압 파형을 보여주고 있다. 그림에서 볼 수 있는 바와 같이 정현적인 분포를 나타내고 있다.

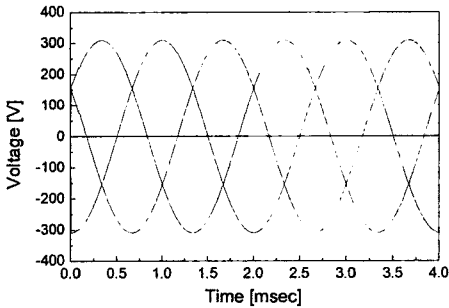


그림 6. 상간 유기전압 특성

FESS에서 10[kW]의 전력을 공급하는 동안, 발전전력과 플라이휠의 각속도는 식 (9)와 식 (10)에 의해 구해진다. 여기서 전력은 발전전력이므로 토크는 제동토크로 (-)를 가져야 한다.

$$P_C = -T\omega = -J \frac{d\omega}{dt} \omega \quad (9)$$

$$\omega = \sqrt{-\frac{2P_C}{J} t + (1000\pi)^2} \quad (10)$$

FESS가 10[kW]의 전력을 공급할 때, 시간에 따른 플라이휠의 회전속도 특성은 그림 7과 같으며, 이때의 발전전압 및 상전류 특성은 그림 8과 같다. 그림에서와 같이 30,000[rpm]에서 발전하기 시작하여 30분 후에는 15,000[rpm], 190[Vrms]로 감소하며, 동일한 출력을 발생시키기 위하여 전류는 증가하게 된다.

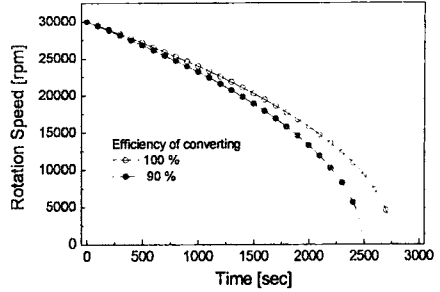


그림 7. 시간에 따른 회전속도 특성

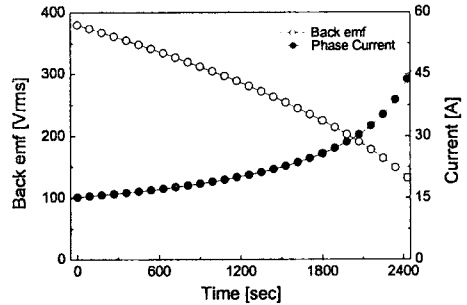


그림 8. 시간에 따른 전압 및 상전류 특성

### 3. 결 론

본 논문에서는 5[kWh], 30,000[rpm]급 플라이휠 에너지 저장장치용 고속 전동발전기를 기본 설계하고 특성을 해석하였다. 선정모델은 슬롯리플에 의한 와전류 손실이나 열손실을 고려하여 슬롯리스 Ring-wound형으로 선정하였으며 유한요소법에 의해 설계된 전동발전기의 특성을 검토하였다.

향후, 손실해석, 열해석 등을 통해 보다 신뢰성 있는 특성해석을 진행하고, 실 제작된 전동발전기의 시험을 통해 설계 및 특성해석 결과를 검토하여 최적의 설계 프로세스를 구축하고자 한다.

### [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, Germany, Sep.13-17, 1993
- [2] H. Hofmann, S.R. Sanders. "Synchronous reluctance motor/alternator for flywheel energy storage systems" in IEE workshop on Power Electronics in Transportation, October 24-25, 1996, Dearborn, Mich. pp. 199-206
- [3] Z. Q. Zhu, K.Ng, and D. Howe, "Design and analysis of high-speed brushless permanent magnet motors", Eight International Conference of Elec. Machines and Drives, pp.381-385, Sep., 1997
- [4] 장석명, 정상섭, 류동완, 최상규, "EMB용 전동발전기 선정을 위한 슬롯형과 슬롯리스 Ring-wound형 영구자석 브러시리스 기기의 특성 비교", 대한전기학회 논문지 제 50B권 3호 pp.107-114, 2001
- [5] 정연호, 강도현, 안종보, 장석명, "마이크로 가스터빈용 고속 전동/발전기 설계에 관한 연구", 2002 대한전기학회 하계학술대회 B권 pp.723-725
- [6] 장석명, 서진호, 정상섭, 최상규, 함상용, "전기기계식 배터리 시스템용 초고속 전동발전기의 설계, 제작 및 모드별 특성", 대한전기학회 제48권 제8호 pp.400-407, 1999