

플라이휠 에너지 저장 장치용 초고속 전동발전기의 설계 및 특성시험

장석명, 서진호, 최상규

Design and Performance Test of High-Speed Motor/Generator for the Flywheel Energy Storage System

S.M. Jang, J.H.Seo, S.K.Choi

Abstract - This paper treated the design and performance test of high speed motor/generator used in the flywheel energy storage system. The unique characteristics of the motor in this paper is the it doesn't contain any magnetic material. The field system was constructed by using Halbach array that generates the magnetic field with the permanent magnet only. The armature was also composed of plastic bobbin and winding. This paper shows the design results have a good agreement with the experimental results.

1. 서 론

플라이휠 에너지 저장 시스템(Flywheel Energy Storage System:이하 FESS)은 양수발전, 압축공기 저장방식과 함께 기계적 에너지 저장방식의 일종으로 화학전지와 같이 소형화, 모듈화가 가능하여 흔히 기계전지(Electro-mechanical Battery)라고 불리운다.

FESS는 플라이휠의 운동에너지와 전기에너지를 상호 변환시키는 장치로서, 가능한 한 회전속도가 초고속이어야 한다. 수만 rpm급 이상 초고속으로 구동되는 모터는 동일 출력의 범용 저속 모터에 비하여 자성체의 체적이 매우 작아져 소형, 경량화가 가능하다.

본 논문에서는 초고속 구동에 가장 적합할 것으로 평가되는 영구자석의 Halbach 배열법을 응용한 특수형 모터를 개발하였다. 즉 자성체를 사용하지 않고 영구자석편만으로 자로를 구성할 수 있는 Halbach 배열을 응용하여 계자를 제작하였다. 또한 코일의 표피효과에 의한 손실 및 철손을 최소화할 수 있는 구조가 되도록 플라스틱 보빈에 매우 작은 직경을 갖는 여러가닥의 리츠선을 사용하여 전기자를 제작하였다. 따라서 계자 및 전기자에는 폐자로를 구성하기 위한 철심이 없으므로 일반형 모터를 고속으로 운전할 때에 필연적으로 발생하는 철손이 전혀 없게 된다. 본 논문에서는 전동발전기외의 FESS에 필요한 구동 드라이버, 자기베어링등의 제작을 완료하여 특성시험을 수행하였으며, 발전기 모드시의 유기전압 등을 측정하여 유기 전압 상승등을 검토하였다.

2 초고속 전동발전기의 설계

2.1 요구사항

전동발전기는 회전체인 플라이휠을 구동하여 입력되는 전기에너지를 회전운동에너지 형태로 저장하였다가, 필요시에는 전기에너지로 출력하여 사용하도록 하는 에너지변환장치이다. 본 연구에서 설계하고자 하는 FESS는 용량 6kW, 저장에너지 550Wh급이다. FESS가 발전기모드일 때, 전기에너지는 플라이휠의 회전속도가 60,000(rpm)으로부터 30,000(rpm)까지 감속하는 동안 전압 300[V]에서 150[V]까지 발생되는 것으로 설정한다. 그리고 전동기모드인 경우 정지상태에서 최대 동작속도인 60,000(rpm)까지 가속하는데 소요되는 시간은 토크 및 용량을 산정하는데 매우 중요한 파라미터가 된다.

Table 5.2 전동발전기의 설계 요구사항

항 목	사 양	항 목	사 양
최대 동작 속도	60,000 [rpm]	가속시간	1800 [sec]
용량	6 [kW]	전기자권선 상수	3
저장에너지	550 [Wh]	권선당 최대 전류 밀도	5 [A/mm ²]
관성모멘트	0.16 [kg · m ²]	입력단자전압	300 [V]

2.2 설계계산

외전형 전동발전기가 발전기로 동작하는 경우의 특성식 유도과정은 다음과 같다. 즉 원통내부의 반경방향 가속밀도는 다음 식 (1)과 같이 주어진다.

$$B(t) = B_0 \cos(\omega t) \quad (1)$$

여기서, B_0 : 내부자속밀도

발전기 모드에서 자속을 쇄교하는 코일의 단면적을 A [m²]라고 할 때 1코일당 유기되는 전압은 시간당 쇄교자속의 변화율로 주어지므로

$$E(t) = -\frac{d\Phi}{dt} = B_0 A \omega \sin(\omega t) \quad (2)$$

가 되며 여기에 전체 턴수 N 을 고려하면 유기전압은 식 (3)과 같다.

$$E(t) = K A N B_0 \omega \sin(\omega t) \quad (3)$$

여기서 K : 기하학적 보정계수

또한, 전동기 모드에서 발생하는 힘은

$$F = 2I(L_a \times B) \quad (4)$$

으로 주어지며, 따라서 토크는 식(5)과 같다.

$$T = r \times F = 2r L_a I B_0 K N \quad (5)$$

여기서 r 은 전기자 반지름, L_a 는 전기자의 축방향 길이, I 는 인가전류이다.

그림 2와 같은 같은 전동발전기의 설계 모델에서 계자의 외반경, 내반경, 공극길이, 축반경을 결정하는 수순은 그림 3과 같다. 본 설계 특성식을 이용한 결과를 표 2에 나타내었다.

3. 초고속 전동발전기의 제작 및 특성시험

3.1 제작

전동발전기의 제작도는 그림 4와 같으며, 계자부분의 각 영구자석편의 자화방향벡터를 표시한 것이며 전기자는 플라스틱으로 된 보빈에 Litz wire를 시행하여 제작하였다. 자화방향벡터는 축을 따라 각 영구자석편마다 45°를 유지하도록 조합되어 있으며 영구자석 바깥쪽은

비자성체인 알루미늄으로서 외부를 둘러싸게 되며 플라이필과 직접 연결된다. Halbach 배열에 의한 자계는 원통 내부에는 강한 자계가 발생하지만 원통의부에는 거의 발생하지 않는다.

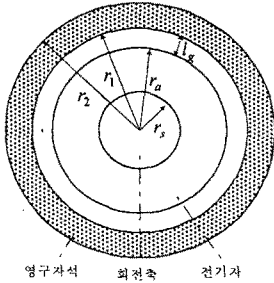


그림 2. 전동발전기의 설계모델

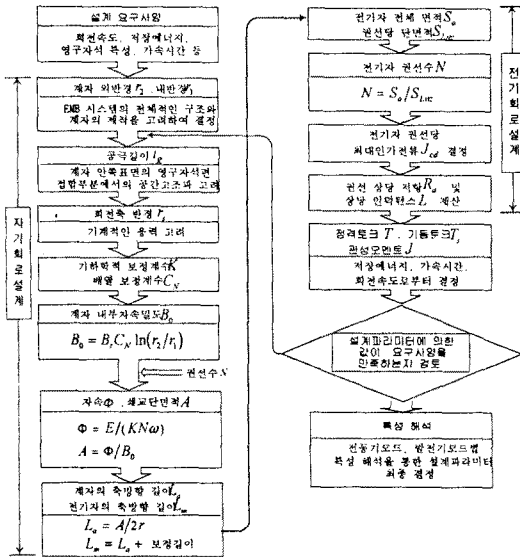


그림 3. 전동발전기의 설계흐름도

표.2 전동발전기의 설계 파라미터

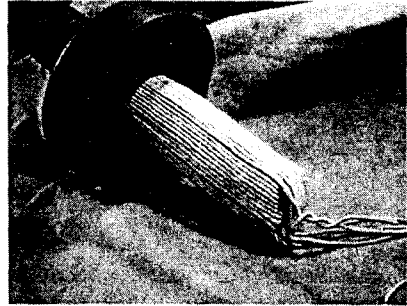
항목	치수	항수	값
내부자속밀도	0.25 [T]	공극 길이	0.4[cm]
영구자석내경	4.5 [cm]	상당 권선수	17
영구자석외경	4.5[cm]	가속시간	1800[sec]
영구자석의 축방향 길이	17.78 [cm]	최대속도까지의 발생토크	0.57[Nm]
전기자 반경	2.55 [cm]	상당저항	0.085 [Ω]
전기자 축방향 길이	17 [cm]	상당 인덕턴스	50 [μH]
회전축 반경	2[cm]	인가전류(상당)	16 [A]

3.2. 특성시험

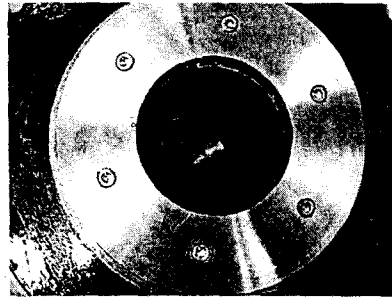
3.2.1 Halbach 배열에 의한 계자특성

전동발전기의 계자로, Halbach 배열을 응용하기 위한 영구자석은 네오디움 계열의 NdFeB로 잔류자속밀도 $B_r = 1.17[\text{Wb/m}^2]$, 보자력 $H_c = -10,800[\text{Oe}]$ 의 값을 가진다. 전동발전기의 계자를 2극으로 구성하기 위하여 NdFeB 영구자석편 16개로 Halbach 배열을 하여 조립하였다. 2차원 유한요소해석에 의한 내부자속밀도 계산값은 0.275(T)인데, 실제 Halbach 배열을 제작하여 측정한 값은 평균적으로 0.25(T)를 나타내었

다. 이중 축방향으로 전개하여 자속분포를 보았을 때의 이론적인 계산치 및 실제 측정치는 그림 6과 같다. 즉 각도에 따른 원주의 각 위치에서의 자속밀도값을 축방향으로 $z=2.5[\text{cm}]$, $z=7.5[\text{cm}]$, $z=12.5[\text{cm}]$ 의 각 위치에서 직경방향으로 중심으로부터 $r=2.5[\text{cm}]$ 의 위치에서 계산값과 측정값을 그래프로 나타낸 것이다.



○ 고정자 권선



○ 복합재질에 장착된 회전자

그림 4. 전기자(上) 및 계자(下)의 제작도

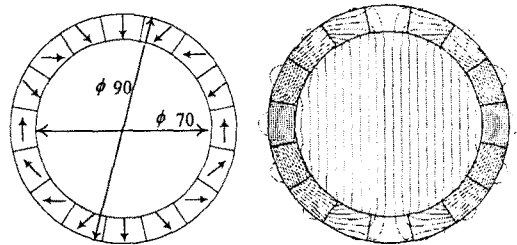


그림 5. 계자의 자속분포해석(unit = mm)

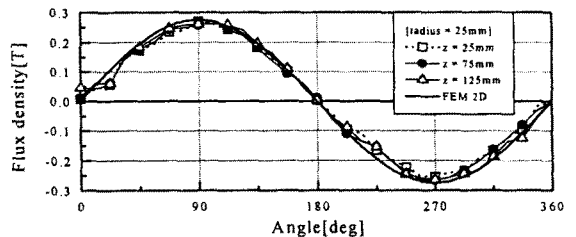


그림 6. 계자내부자속밀도의 해석치 및 측정치 비교

3.2.2 초고속전동발전기의 특성시험

발전기모드에서의 무부하시 입력주파수에 따른 상당 발전전압은 전기자 및 계자에 철심이 없으므로 철심의 자기포화를 고려할 필요가 없기 때문에, 선형적인 특성을 갖게 된다. 따라서, 발전기모드에서 무부하시 유기

되는 상전압의 최대치는 최대동작속도인 1kHz에서 160[V], 정격속도인 750 Hz에서 120[V], 최저동작속도인 500Hz에서 80[V]의 전압이 유기된다.

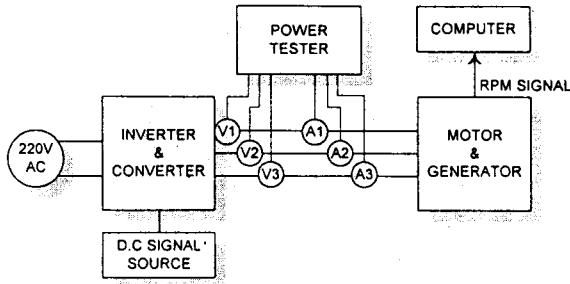


그림 7. 전동발전기의 특성을 시험하기 위한 결선도

그림 8은 D.C signal source의 전압값에 따라 입력 전압 및 입력전류가 선형적으로 증가함을 보여주고 있다. 그림 8에서 횡축은 시간으로서 단위는 20[s/div]이며, 종축에서 전압은 200[V/fs], 전류는 20[V/fs]이다.

발전기 모드에서 유기전압의 특성을 파악하기 위해 u-v, v-w상에서의 파형을 측정하였으며, 그 결과를 그림 9에 제시하였다. 반경방향 자속이 매우 정현적으로 분포되어 있기 때문에 발생하는 유기전압도 그림 9와 같이 정현적인 파형이 된다.

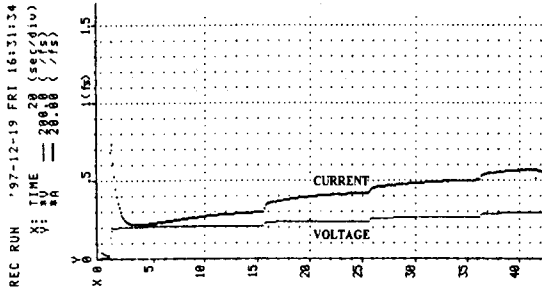


그림 8. 입력전압 및 입력전류 (횡축-시간, 종축-전압, 전류)

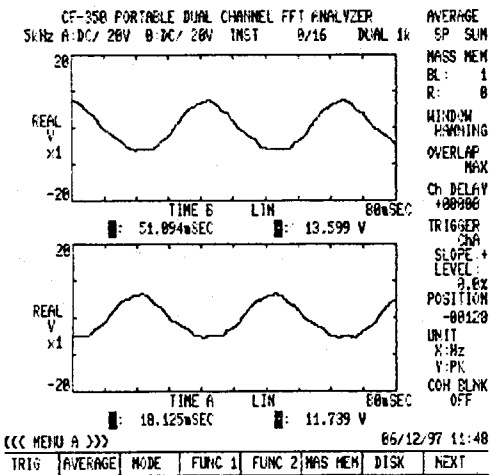


그림 9. 유기전압 파형

그림 10은 발전기 모드에서 상당 발생하는 유기전압의 실효치를 회전속도에 대비하여 나타낸 것이다. 본 실험

결과에 의하면 실험치의 값이 이론치보다 다소 높게 나타났다. 유기전압상수에 대한 이론식 및 그림 10의 실험데이터에 의한 값은, 실험치에 의한 유기전압상수가 2.915 [V/krpm], 이론식에 의한 값이 2.70 [V/krpm]으로서 실험치가 다소 높다.

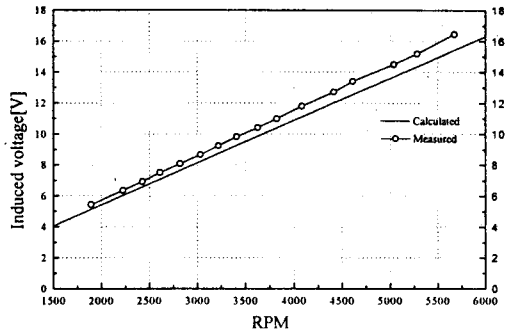


그림 10. 회전속도에 따른 유기전압특성

4. 결론

본 논문에서는 FESS 시스템의 구동원으로서 응용되는 2극 60,000rpm급 초고속전동발전기의 설계 및 특성시험에 관한 연구를 하였다. 즉 전동발전기의 전동기 및 발전기 모드별 특성방정식을 유도하여 FESS 전체 시스템에서 요구되는 설계사양을 만족시킬 수 있도록 설계하였으며, 도출된 설계파라미터에 의하여 초고속전동발전기의 시작품을 제작하였다. 그리고 전동발전기의 구동 드라이버와 FESS의 자기베어링 등의 주요부품의 제작을 통한 시스템 구성을 완료하여 특성시험을 수행하였다. 전동발전기의 주요특성을 파악하기 위해서는 전동기모드에서의 입력전압 및 전류, 전동기 출력, 발전기 모드에서의 유기전압의 파형, 크기, 유기전압상수, 그리고 전체적인 효율 등이다.

이와 같은 특성을 전체적으로 시험하기 위해서는 무엇보다도 회전속도를 60,000[rpm]까지 가속시켜 최종부하 시험까지 수행하여야 했으나, FESS의 부득이한 가공오차 및 조립오차에 따른 예기치 않았던 비선형 거동을 하게됨에 따라 최대 9800rpm까지만 운전할 수 있었다. 그러나 9,800[rpm]까지의 특성시험결과 유기되는 전압 파형이 매우 정현적이었으며, 또한 유기전압상수가 이론식과 유사하게 나온 점등을 감안할 때 전동발전기의 제작 및 전기자 권선의 설계는 타당하다는 결론을 내릴 수가 있다.

본 연구는 한국전력공사(기초전력공학 공동연구소)의 연구과제 95-지-04의 일부와 통산산업부(에너지관리공단)의 연구비 지원에 의하여 수행된 연구결과입니다.

[참고 문헌]

- [1] K. Halbach, "Design of Permanent Multipole Magnets with Oriented Rare Earth Cobalt Material", Nuclear Instruments and Methods, 169, 1980 (pp.1-10)
- [2] B.T. Merritt, R.F. Post, G.R. Dreifuerst, D.A. Bender, "Halbach Array Motor/Generators-A Novel Generalized Electric Machine", Lawrence Livermore National Laboratory
- [3] Trumper, D. L., Kim, W.-J., and Williams, M. E., "Design and Analysis Framework for Permanent-Magnet Machines," IEEE Transactions on Industry Applications, vol. 32, no. 2, pp. 371-379, March/April 1996