

**5kWh급 초전도 플라이휠 에너지 저장장치용 전동발전기 개발**

최태식, 권형남, 송중환, 고우식, 류동완, 성태현\*, 한상철\*  
(주)효성, 한전전력연구원\*

**Development of Motor/Generator  
for 5kWh Superconductivity Flywheel Energy Storage System**

T. S. Choi, H. N. Kwon, J. H. Song, W. S. Koh, D. W. Ryu, T. H. Sung\*, S. C. Han\*  
Hyosung Corporation, KEPRI\*

**Abstract** - 본 연구에서는 고효율, 반영구적인 수명 및 환경친화성으로 인해 효과적인 전력저장장치로 대두되고 있는 플라이휠 에너지 저장시스템 (FESS : Flywheel Energy Storage System)의 구동원으로 적용되는 전동발전기와 전력변환기에 대한 설계 및 제작을 수행하였다. 연구 대상 FESS의 저장용량은 5[kWh]이며 운전 속도는 30,000rpm이다. 전동발전기는 슬롯리플에 의한 와전류 손실이나 열손실을 고려하여 슬롯리스 Ring-wound형으로 선정하였으며, 전력변환기는 PWM Boost 컨버터를 통해 역률 및 DC 전압 제어 그리고 Full Bridge 인버터를 통해 전동발전기 고속운전 제어를 실현할 수 있는 Topology를 채택하였다.

**1. 서 론**

FESS는 입력되는 전기에너지를 플라이휠의 회전운동 에너지로 변환하여 저장하고, 필요 시 전기에너지로 출력하는 장치로서 화학전지와 같이 소형화, 모듈화가 가능하며 또한 수명이 반영구적이므로 효과적 전력저장장치로 대두되고 있다. [1][2]

FESS에서의 에너지 흐름은 전동모드(Motoring Mode)와 발전모드(Generating Mode)의 두 가지 형태로 나타나는데 전동모드 시에는 계통전원으로부터 전기에너지가 유입되어 플라이휠에 기계 에너지 형태로 저장되며, 발전모드 시에는 역으로 플라이휠에 저장된 기계 에너지가 전력변환기를 통해 전기 에너지의 형태로 계통으로 주입 또는 직접 부하로 인가된다.

구성 기기에는 에너지저장을 위한 복합재 플라이휠 로터, 공기마찰에 의한 에너지 손실저감용 진공펌프 및 용기, 지지부 접촉마찰로 인한 에너지 손실 저감용 베어링/제어부, 플라이휠 구동 및 발전을 위한 전동발전기, 고효율 에너지 입력력 전력변환기 등이 있다.

이 중 전동발전기는 소형, 초고속 및 고효율의 특성을 가져야 하는데 유도기, 동기기, 영구자석형 동기 전동기 및 릴럭턴스 전동기 등 다양한 전동기 형태가 적용되고 있다. 최근에는 NdFeB와 같은 고밀도의 영구자석을 사용함으로써 고휘출력 에너지를 얻을 수 있는 영구자석 브러시리스 기기의 응용이 증가하고 있다. [3]

전력변환기는 전동 및 발전모드 실행을 위해 전력흐름의 양방향 제어가 가능하여야 하는데 전동모드의 경우 수만 rpm이상의 초고속 회전을 구현해야 하며, 발전모드에서는 계통 연계 제어를 구현해야 한다.

본 연구에서는 5kWh급 초전도 플라이휠 에너지 저장 시스템에 적용될 전동발전기 및 전력변환기의 설계, 제작을 수행하였다. 전동발전기에는 유기전압을 정현파 형태로 구현한 슬롯리스 Ring-wound형의 영구자석 동기 전동기를 적용하였으며, 전력변환기는 컨버터부와 인버터부가 DC Link를 공유하는 Topology를 적용하여 양방향 제어가 가능하도록 하였다. [4]

**2. FESS용 전동발전기 및 전력변환기**

**2.1 전동발전기 설계·제작**

FESS는 전동발전기가 비접촉식으로 진공 속에 놓여 손실에 의해 발생된 열은 복사에 의해서만 냉각되므로 손실을 최소화 해야한다. 특히 토크가 영(零)이고 정격 속도로 회전하면서 플라이휠에 에너지를 저장하고 있는 에너지 저장모드에서의 손실이 최소화 되어야한다. 이는 고정자 철손과 회전자 와전류 손실을 최소화함으로써 해결할 수 있다. 이러한 관점에서 본 연구에서는 일반적인 영구자석 회전기에서 발생하는 코깅토크 리플과 슬롯리플에 의한 고조파 손실을 최소화한 슬롯리스 Ring-wound형의 영구자석 동기기를 선정하였다.[5]

또한 고속 회전기에서는 회전수의 제곱에 비례하는 원심력이 회전체에 작용하여 상당한 기계적인 스트레스를 발생시킨다. 따라서, 회전자는 고속회전 시 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 티타늄 재질의 원통형 슬리브를 적용하였다.

전동발전기의 설계 요구사항은 표 1과 같으며, 전동기 설계 결과는 표 2와 같다. 그림 1은 설계된 전동발전기의 단면도를 나타내며, 그림 2는 실제 제작된 전동발전기의 영구자석 회전자와 고정자를 나타낸다.

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]

표 2 Ring-Wound형 전동발전기의 설계 파라미터

항목	치수	항목	치수
내부자속밀도	0.344[T]	극 수	2
상당 권선수	54[turn]	기계적 공극	1[mm]
전기자 권선 내반경	39[mm]	전기자 권선 외반경	79[mm]
영구자석 축방향 길이	60[mm]	전기자 축방향 길이	60[mm]
회전자 반경	37[mm]	회전축 반경	25[mm]
Sleeve (can)두께	2[mm]	Sleeve (winding)두께	1[mm]

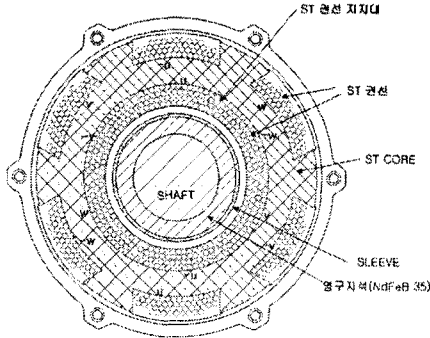


그림 1. 전동발전기 단면도

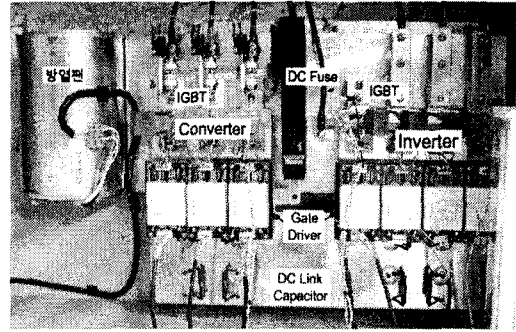
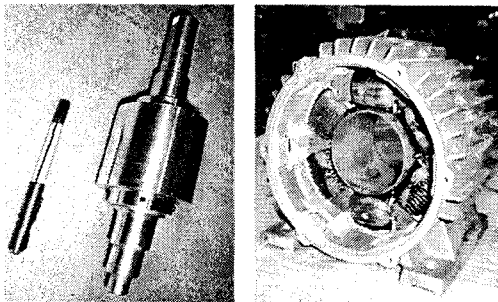


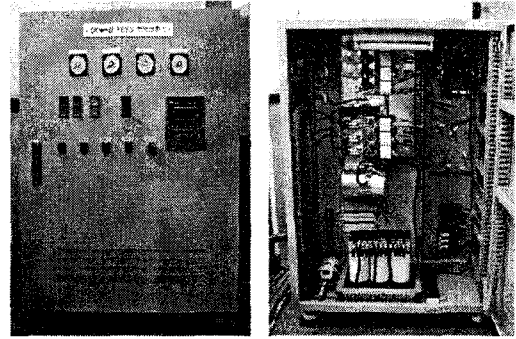
그림 4. FESS용 스위칭부



(a) 영구자석 회전자

(b) 고정자

그림 2. 전동발전기 제작도



(a) 외형도

(b) 내부 구성도

그림 5. 제어 Panel

## 2.2 전력변환기의 설계·제작

FESS에서 전력변환기는 전력의 입출력을 모두 담당하게 됨으로 전동모드 및 발전모드의 양방향 운전이 가능하여야 한다. 그림 3은 이러한 운전이 가능한 전력변환기의 주 회로도이다. 그림에서 보는 바와 같이 FESS는 플라이휠이 부착된 전동발전기, 컨버터 및 인버터 그리고 이를 제어하기 위한 제어기로 구성된다.

컨버터는 PWM Boost 컨버터를 채택하여 계통으로부터 전력 입력 시 평균전류를 연속모드에서 제어하여 역률개선 및 고조파 저감을 피하고 DC Link의 전압을 일정한 크기로 상승시키는 동작을 하며, 계통으로 전력 공급 시 고조파 및 부하 영향에 우수한 특징으로 정현파 전압을 출력하도록 하였다. 인버터는 3상 Full Bridge 인버터를 채택하여 고속 스위칭 동작을 통해 전동발전기의 정·역회전, 전동·발전의 4상한 운전을 실현하여 일정 전력의 수급을 가능하게 하였다.

그림 4는 제작된 컨버터, 인버터 일체형의 스위칭부를 나타낸 것으로 IGBT 소자와 방열팬, 방열판, DC Link 커패시터 그리고 Gate Drive 등으로 구성된다. IGBT 소자는 정격 전압 1,200V, 정격 전류 100A(25°C)인 세미크론사의 SKM 100GB 128DN을 사용하였으며, 스위칭 주파수는 10kHz이다.

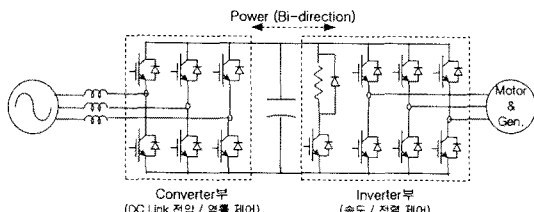


그림 3. FESS 전력변환기 주 회로도

그림 5는 FESS 운전을 위해 컨버터 및 인버터, 제어보드, 인덕터, 센서류, 스위치 및 메타류 등을 배치하여 제작된 제어 Panel의 전체 외형도 및 내부 구성도이다. 패널 보드에 표시될 값들은 계통 입출력 전압, DC Link 전압, 전동발전기 회전 속도, 입출력 전력 등이 있다.

## 3. 시험 결과

### 3.1 전동발전기 시험

제작된 전동발전기에 대하여 전기자 권선저항, 역기전력 파형 및 역기전력 크기를 시험하고자 고정자 단독으로 입력전원 주파수 변화에 따른 각각의 선간 저항값의 변화를 비교하였으며, 외부에서 전동발전기를 구동하여 속도 변화에 따른 역기전력 변화와 이때의 상 전압 파형을 비교하였다.

그림 6은 주파수에 따른 선간 저항값을 제작된 전기자에 대한 측정을 통하여 도시한 것이다. 저항값은 주파수가 증가할수록 크기가 증가하며 각 선간 저항값은 1%이내의 오차값을 가지고 있다.

발전모드에서 속도에 따른 유기전압 특성을 파악하기 위해 전동발전기에 외부 구동용 전동기를 연결하여 발전 전압을 측정하였다. 그림 7은 1,000rpm 무부하 회전시 유기되는 상전압 파형을 오실로스코프로 측정한 것이다. 본 연구에서 연구된 전동발전기는 회전자가 직경방향으로 자화되어 있기 때문에 정현적인 자속밀도 분포를 가지므로 발전 전압도 매우 정현적이며 각 상이 120°의 위상차를 갖는 것을 알 수 있다. 또한 유기 전압이 1,000rpm에서 상전압의 피크치가 10.47V이므로 속도에 대해서 선형적으로 증가할 경우 30,000rpm에서 각 상의 rms전압이 384V가 됨으로 설계치 380V에 대해 약 1%오차 범위에 속하게 된다.

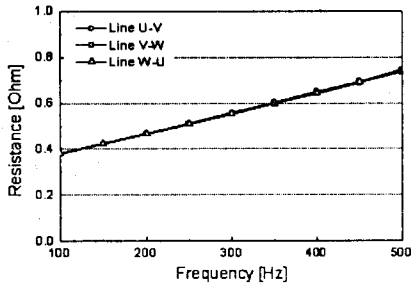


그림 6. 주파수에 따른 선간 저항값 변화

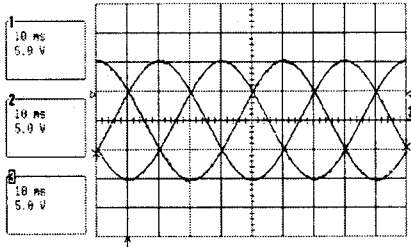


그림 7. 3상 유기 전압 파형 (@1,000rpm)

### 3.2 조합 시험

전동발전기와 전력변환기를 결합한 조합시험을 수행하였다. 전동발전기를 무부하 속도제어 운전하여 고속 운전 시 특성을 시험하였으며, 부하 시험은 고속 동력계 적용의 어려움으로 인해 전동발전기 두 대를 병렬로 연결하여 Back-to-back 시험을 실시하였다.

그림 8은 속도 지령에 따른 운전속도 추종을 나타내며 10,000rpm까지 무부하로 운전한 파형이다.

그림 9는 Back-to-back 시험 회로도이다. 초기 DC Link 충전은 Diode 정류기를 통해 이뤄지며 이후에는 손실분만이 계통에서 공급된다. 병렬로 연결된 두 대의 인버터와 전동발전기는 각각 전동모드와 발전모드로 운전되며 이를 통해 부하 상태를 모의하게 된다.

그림 10은 시험 설비 구성도이다.

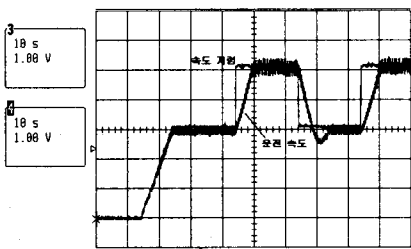


그림 8. 무부하 속도 특성

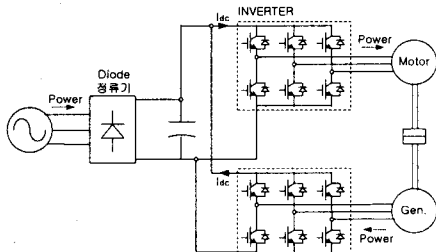


그림 9. Back-to-back 시험 회로도

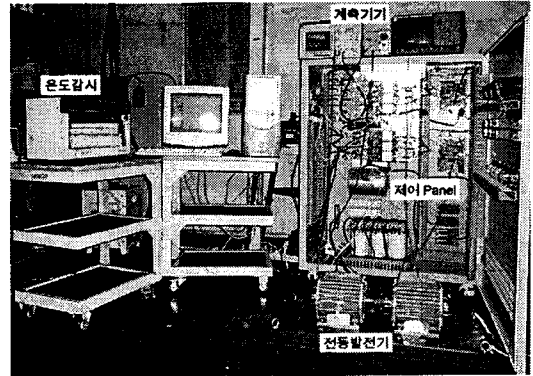


그림 10. 시험 설비 구성도

## 4. 결 론

본 논문은 초전도 플라이휠 에너지 저장 기술 개발 과제 1차년도 연구성과 중 전동발전기 및 전력변환기 개발 부분의 결과이다. 5[kWh], 30,000[rpm]급 플라이휠 에너지 저장장치용 고속 전동발전기 및 10[kWh] 전력변환기의 설계 및 제작을 수행하였다.

전동발전기는 슬롯리플에 의한 와전류 손실이나 열손실을 고려하여 슬롯리스 Ring-wound형으로 선정하였으며, 전력변환기는 PWM Boost 컨버터를 통해 역률 및 DC 전압 제어 그리고 Full Bridge 인버터를 통해 전동발전기 고속운전 제어를 실현할 수 있는 Topology를 채택하였다.

향후, 운전 속도를 목표치인 30,000rpm까지 증가시키기 위한 제어 기술 개발 및 이에 따른 전동발전기 특성 변화에 대한 연구와 Back-to-back 시험을 통한 플라이휠 부하 모의 시험 연구를 통해 5[kWh]급 FESS의 성공적 제작을 수행하고자 한다.

본 연구는 산업자원부에서 시행한 전력산업연구개발사업의 지원에 의하여 수행된 연구결과입니다.

### [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, Aachen, 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] Jai P. Agrawal, "Power Electronic Systems - Theory and Design", Prentice-Hall, Inc., 2001
- [5] 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