

초전도 플라이휠 에너지 저장장치용 전동발전시스템 개발

최태식, 서문석, 서인영, 류동완, 성태현*
(주)효성, 한전전력연구원*

Development of Motor/Generator System
for Superconductivity Flywheel Energy Storage System

T. S. Choi, M. S. Seo, I. Y. Suh, D. W. Ryu, T. H. Sung*
Hyoosung Corporation, KEPRI*

Abstract - 본 연구에서는 고효율, 반영구적인 수명 및 환경친화성으로 인해 효과적인 전력저장장치로 대두되고 있는 플라이휠 에너지 저장(SFES : Superconductivity Flywheel Energy Storage) 시스템의 구동원으로 적용되는 전동발전시스템에 대한 설계, 제작 및 시험을 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.

본 연구에서 전동발전기에는 유기전압을 정현파 형태로 구현한 슬롯리스 Ring-wound형의 영구자석 동기 전동기를 적용하여 소형, 초고속 및 고효율을 달성코자 하였으며, 전력변환기는 컨버터부와 인버터부가 DC Link 커패시터를 공유하는 Topology를 적용하여 전동모드 및 발전모드의 양방향 제어가 가능하도록 하였다. [3]

1. 서 론

일반적인 플라이휠 에너지 저장 시스템은 입력되는 전기에너지를 플라이휠의 회전운동에너지로 변환하여 저장하고, 필요 시 전기에너지로 출력하는 장치로서 화학전지와 같이 소형화, 모듈화가 가능하며 또한 수명이 반영구적이므로 효과적 전력저장장치로 대두되고 있다. [1][2] 특히, SFES 시스템은 전력저장 시 큰 손실원을 최소화하는 베어링에 비접촉형인 초전도 마그네트를 적용함으로써 효율을 극대화하였다.

SFES 시스템에서 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 그림 1과같이 에너지저장을 위한 복합재 플라이휠 로터, 공기마찰에 의한 에너지 손실저감용 진공퍼프 및 용기, 지지부 접촉마찰로 인한 에너지 손실저감용 베어링/제어부, 플라이휠 구동 및 발전을 위한 전동발전기, 고효율 에너지 입출력 전력변환기 등이 있다.

2. SFES 시스템용 전동발전시스템 제작

2.1 전동발전기 설계·제작

SFES 시스템은 전동발전기가 비접촉식으로 진공 속에 놓여 손실에 의해 발생된 열은 복사에 의해서만 냉각되므로 손실을 최소화 해야한다. 특히 고속운전시 크게 나타나는 고정자 철손과 회전자 와전류 손실을 최소화함으로써 해결할 수 있다. 이러한 관점에서 영구자석 회전기에서 발생하는 코강도크 리플과 슬롯리플에 의한 고조파 손실을 최소화한 슬롯리스 Ring-wound형의 영구자석 동기기를 선정하였다.[4]

또한 고속회전에서 영구자석 회전자의 기계적인 강도를 높이기 위해 비자성체 또는 비금속 재질의 슬롯리스를 부착하기도 하는데, 본 설계에서는 기계적 스트레스를 고려하여 티타늄 재질의 원통형 슬리브를 적용하였다.

슬롯리스 Type의 기기는 일반적인 슬롯 Type 기기보다 자기적인 공극이 매우 크기 때문에 고정자 끝단으로 누설되는 자속의 양이 증가하여 초전도 베어링의 자속과 상호 작용으로 초전도 베어링의 특성을 변화시킬 수 있다. 이에 대해서는 설계 모델에 대한 3차원 FEM해석 결과 고정자 끝단 40[mm]지점에서 누설자속이 자성체축의 경우 약 0.02[T], 비자성체축의 경우 약 0.01[T]로 나타나 초전도 베어링에 미치는 영향이 미약한 것으로 판단되었다.

전동발전기 설계 결과는 표 1과 같다. 자기적 공극이 19[mm]로 크게 나타나고 있다. 그림 2는 제작된 전동발전기의 영구자석 회전자와 고정자를 나타낸다.

표 1 Ring-Wound형 전동발전기의 설계 결과

항목	사양	항목	사양
최대 속도	30,000[rpm]	용량	10[kW]
내부자속밀도	0.344[T]	극수	2
상당 권선수	54[turn]	Sleeve (can)두께	2[mm]
전기자 권선 내반경	78[mm]	전기자 권선 외반경	158[mm]
자기적 공극	19[mm]	전기자 철심두께	15[mm]
전기자 축방향 길이	60[mm]	영구자석 축방향 길이	60[mm]

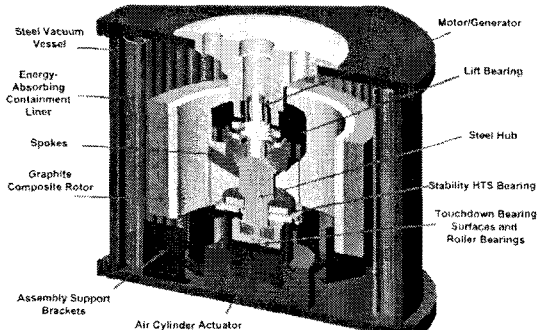


그림 1. SFES 시스템 구성도

2.2 전력변환기 설계·제작

전동모드 및 발전모드의 양방향 운전이 가능하도록 PWM 컨버터와 PWM 인버터가 DC Link 커패시터를 공유하는 Topology를 적용하였다. 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.

제어부에는 TMS320C31 DSP를 적용하여 고속 연산이 가능하도록 하였으며 위치검출부에는 Hall 센서를 적용하였다. 일반적으로 고속 정밀 제어를 위해서는 고성능 Encoder를 사용하는데, 본 연구에서는 초고속 운전 에 따른 기계적 문제와 고가의 경제적 문제로 인하여 Hall 센서 신호를 제어 프로그램을 통해 Software적으로 처리하였다.

그림 3은 제작된 컨버터, 인버터 일체형의 스위칭부를 나타낸 것으로 IGBT 소자와 방열팬, 방열판, DC Link 커패시터 그리고 Gate Drive 등으로 구성된다.

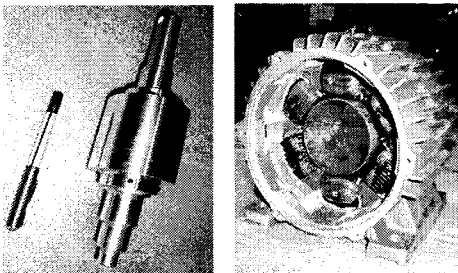
3. 시험 결과

3.1 무부하 시험

무부하 상태에서 제작된 전동발전기의 유기전력 측정 및 고속 운전 시험을 수행하였다.

그림 4는 1,000rpm의 속도로 회전시 회전시 유기되는 3상전압이다. 상전압의 피크치가 10.47V이므로 유기 전압이 속도에 대해서 선형적이라고 가정할 경우 30,000rpm에서 각 상의 rms전압이 384V가 됨으로 설계치 380V에 대해 약 1%오차 범위에 속하게 된다.

그림 5는 무부하 상태에서 30,000rpm 운전 시 D/A Converter로 측정된 속도와 Hall 센서 신호 파형이다. 전동발전기의 자극이 2극이므로 기계각과 전기각이 동일하게 된다. 따라서 Hall 센서 신호의 주파수를 통해 속도를 측정할 수 있다.



(a) 영구자석 회전자 (b) 고정자
그림 2. 전동발전기 제작도

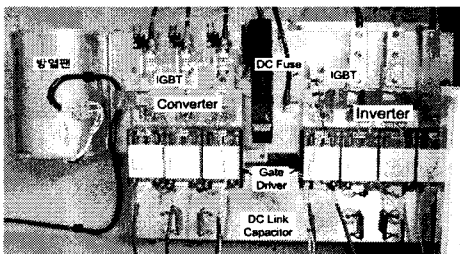


그림 3. SFES 시스템 전력변환기 스위칭부

그림에서 Hall 센서 신호의 주기가 2ms이므로 이 때의 속도는

$$N_{rpm} = 60 \times \frac{1}{2 \times 10^{-3}} = 30,000 [rpm]$$

이 된다.

3.2 PWM 승압형 Converter 시험

DC Link 전압 및 역률 제어기능을 담당하는 PWM 승압형 Converter에 대한 성능시험을 하였다.

그림 6은 DC Link 커패시터 양단간의 전압을 측정 한 파형이다. Converter의 입력전압이 380V_{rms}이므로 다이오드 정류기를 적용할 경우 이론상 DC Link 커패시터 양단간의 전압은 537.4V_{DC}가 된다. 하지만 PWM 스위칭을 하는 인버터를 통해 380V_{rms}의 계통으로 전력을 공급하고자 할 경우 DC Link 커패시터 전압은 700V_{DC} 이상으로 유지되어야 안정된 스위칭 동작으로 전력을 공급할 수 있으므로 본 시스템에서는 PWM 승압형 Converter를 통해 DC Link 커패시터 전압을 537.4V_{DC}에서 700V_{DC}로 승압하였다.

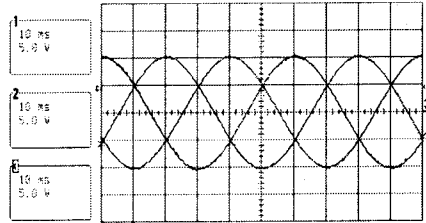
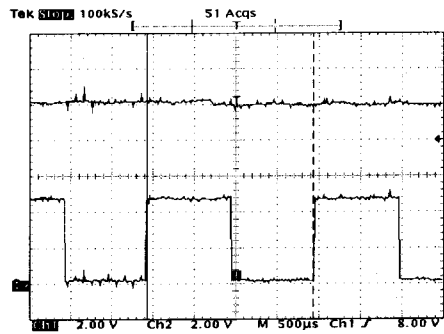
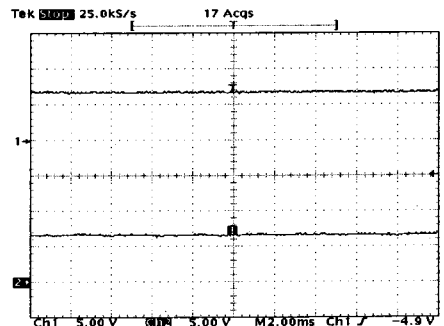


그림 4. 3상 유기 전압 파형 (@1,000rpm)



Ch1 : 운전속도(6,000rpm/div.)
Ch2 : Hall센서 신호(2V/div.)
그림 5. 무부하 운전 (@30,000rpm)



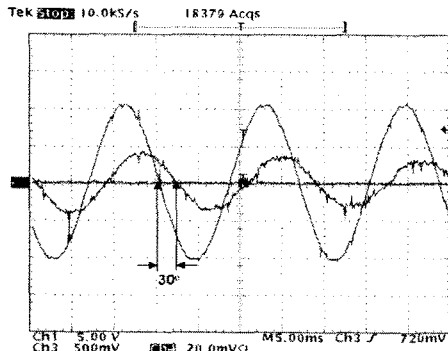
Ch1: 전압지령(500V/div) Ch2: 전압제어(500V/div)
그림 6. 컨버터 DC Link 커패시터 전압

그림 7은 Converter로 입력되는 전력의 역률제어 수행한 파형이다. 역률제어 결과 컨버터 입력 선간전압과 상전류는 30° 위상 차이를 가지게 된다.

3.3 부하 시험

그림 8과 같이 시험 장치를 구성하여 부하시험을 수행하였다. Motoring Mode에서는 계통으로부터 전력을 공급받아서 No.1 Panel에 의해 No.1 전동발전기(M/G)가 전동운전을 수행한다. Generating Mode에서는 No.1 전동발전기에 연결되어 있는 No.2 전동발전기가 발전기로 동작하여 전력을 No.2 Panel로 공급하며 이 전력을 PWM 스위칭 동작을 통해 계통연계 운전을 한다.

그림 9, 10은 10,000rpm에서 12A_{peak}로 부하운전할 때의 전동모드와 발전모드 각각의 선간전압, A상전류 파형이다. 전동모드에서는 전압, 전류가 동상이 되어 전력이 (+)값으로 전력을 소비하며, 발전모드에서는 전압, 전류가 역상이 되어 전력이 (-)값으로 전력을 소비하게 된다.



Ch3: 선간전압(250V/div) Ch4: 상전류(2A/div)

그림 7. 컨버터 입력 전압/전류

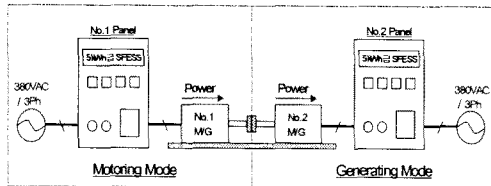
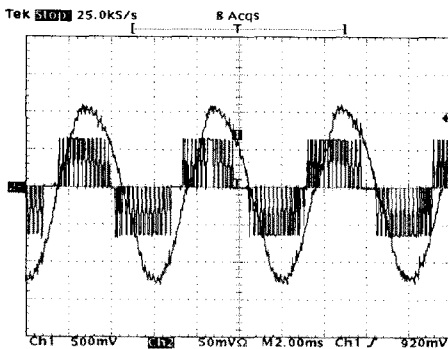


그림 8. 부하시험 장치 구성도



Ch1: 선간전압(250V/div) Ch2: A상전류(5A/div)

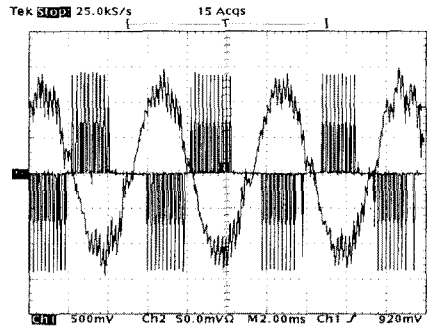
그림 9. 전동모드 시 인버터 전압/전류

그림 11은 10,000rpm에서 5kW 출력으로 운전 시 컨버터를 통해 계통으로 주입되는 전압/전류 파형이다.

4. 결 론

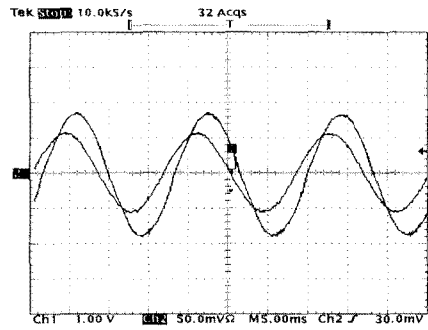
본 논문은 초전도 플라야휠 에너지 저장 기술 개발 과제 2차년도 연구성과 중 전동발전시스템 개발 부분의 결과이다. 10kW, 30,000rpm급 전동발전기 및 전력변환기를 제작하여 단독시험으로 수행하였다.

부하운전은 5kW까지 수행하였으며, 향후 SFES 시스템을 구성하여 최종 목표인 10kW 부하운전 시험을 하고자 한다.



Ch1: 선간전압(250V/div) Ch2: A상전류(5A/div)

그림 10. 발전모드 시 인버터 전압/전류



Ch1: A상전압(200V/div) Ch2: A상전류(2A/div)

그림 11. 컨버터 발전 전압/전류 (5kW)

본 연구는 산업자원부에서 시행한 전력산업연구개발사업의 지원에 의하여 수행된 연구결과입니다.

[참고 문헌]

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