

Electric Power Conversion System for Flywheel Energy Storage System using High Tc Superconducting Bearings

고온초전도체 베어링을 사용하는 플라이휠 에너지 저장 시스템을 위한 전력변환 시스템

Hwan-Myoung Jeoung, Jaeho Choi, Ho-Jin Lee*, Gye-Won Hong*

정환명, 최재호, 이호진*, 홍계원*

48 Gaesin-dong, Cheongju Chungbuk, Korea, 361-763
Chungbuk National University
*Korea Atomic Energy Research Institute

충북 청주시 흥덕구 개신동 산 48
충북대학교 전기공학과
*한국 원자력 연구소

This paper presents an high efficiency energy conversion system for very high-speed flywheel energy storage system using high Tc superconducting bearings. Main configuration of power convertor is designed to replace of the conventional battery with EMB(Electro Mechanical Battery). PMSM(Permanent Magnet Synchronous Motor) using Halbach array is used as the energy conversion system of motor and generator. Some PWM methods for the high frequency inverter is described and the power factor effects to the torque characteristics and efficiency of the motor and generator is analyzed. As the results, it is verified that the inverter output current is well regulated to be in-phase or inverse-phase sinusoidal waveform to have the wide operational range from 2,500rpm to 42,000rpm. Proposed circuit is designed to obtain the very high speed, high efficiency and stable rotational characteristics, and to be applied to 1.2[kW]/65[Wh] system.

1. 서론

본 논문에서는 초전도 플라이휠 에너지 저장 시스템을 위한 전동/발전기의 초고속 운전과 전력변환을 위한 전력변환기 설계에 대해 연구하였다. 최근 전산기기사용의 증가로 인해 안정된 전력환경이 더욱 절실하게 요구되게 되었으나 일일 전력사용량의 낮시간 편중에 의한 부하율감소로

인해 전력환경은 점점 악화되고 있으며 고효율 에너지 저장 시스템을 이용한 부하율 개선이 필요하게 되었다. 기존의 배터리 에너지 저장시스템은 효율이 약60[%]로 낮고 유해가스를 발생하며 재사용시 비용이 증가하고 주기적으로 교체하여야 하는 단점이 있었다. 플라이휠 에너지 저

장시스템은 잉여의 전력을 회전체의 회전관성에너지로 변환하여 저장한 다음 필요시 회생동작을 통해 사용하게 된다. 플라이휠 에너지 저장시스템은 반복사용에 대해 수명이 반 영구적이고 유지보수가 필요 없는 장점이 있으나 휠 재료, 베어링, 전동발전기, 전력변환기, 진공문제등 수반되는 부분이 모두 초고속, 저손실로 운전되어야 하는 어려움을 이유로 지금까지 특수한 목적을 제외하고는 상품화되거나 개발되지 못하고 있다. 최근 관련분야연구개발은 활발히 진행되고 있으며^[1,5] 특히 초전도체 위에서의 영구자석의 부상력을 이용한 베어링을 사용할 경우 매우 높은 효율의 안정된 베어링 제작이 가능해짐에 따라 새로운 관심을 갖게 되었다^[2,3,4]. 따라서 본 논문에서는 초전도 자기부상 베어링을 사용하며 휠 부분에 무게15[Kg], 관성모멘트0.098[Kgm²], 최대회전수42000[RPM]의 SUS금속을 사용하고 전동/발전기에는 Halbach배열의 영구자석 계자를 갖는 영구자석 동기전동기를 사용하는 초전도 자기부상 베어링을 사용한 플라이휠 에너지 저장시스템의 초고속, 고효율 운전을 위한 전력변환기의 설계 및 제어에 관해 연구하였으며 시작품 제작을 통해 성능을 분석하였다. 제안된 전력변환기는 저속과 고속에서 인버터 출력전류를 정현파로 역기전력과 동상으로 제어되어 설계특성을 만족하였으며 7000[RPM]에서 400[W]/25[sec]의 직류 전력을 회생하였다.

2. 전력변환기 설계

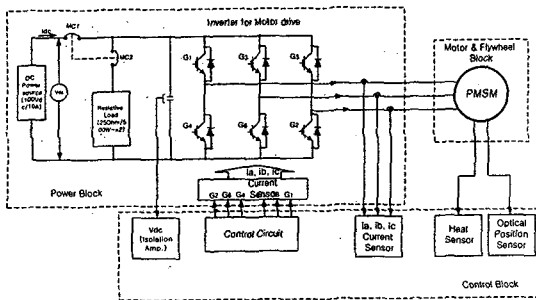


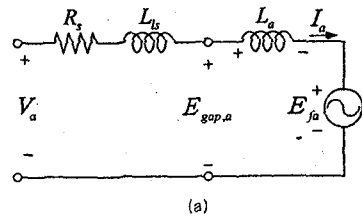
그림 1. 실험에 사용된 주 전력회로

그림 1에서는 기존의 연축전지를 대체할 목적으로 EMB(Electro Mechanical Battery)로써 동작할 수 있도록 구성된 주 전력회로와 제어를 위한

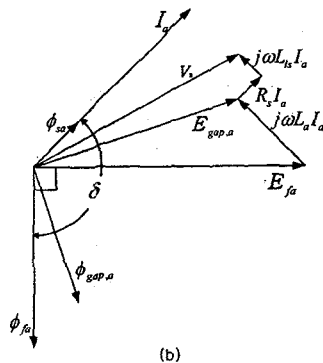
피이드백요소를 나타내고 있다.

주전력회로는 100[V]/10[A]의 출력 용량을 갖는 직류전원공급장치를 직류단에 연결하여 실험을 수행하였다. 직류전원은 가속시 MC1에 의해 직류커패시터와 연결되어 직류원으로부터 인버터와 모터를 통해 휠에 에너지가 저장되며 MC2는 회생모드에서 부하로 MC1과 연동하며 휠이 가지는 기계적인 운동에너지는 모터와 인버터를 통해 직류부하에 필요한 전기에너지로 제어되어 일정 전압으로 저장부하1[kW]에 인가되게 된다. 추후 이 부하부문에 대해서는 직류부하로써 인버터 혹은 전압형 컨버터가 연결 될 수 있으며 두 시스템을 병렬로 구성한 경우 부하에 교류전력을 공급함은 물론 전압형 컨버터에 의한 계통연계가 가능해짐으로써 휠에너지를 계통에 공급하거나 무효전력보상기능을 갖도록 제어될 수 있도록 구성하였다.

3. 전동 발전기의 제어



(a)



(b)

그림 2.(a) 영구자석동기전동기의 a상 등가회로
(b) 페이저도

그림 2에서는 동기전동기의 a상에 대한 등가회로와 페이저도를 나타내고 있다. $E_{gap,a}$ 는 전기자전류에 의한 자속 ϕ_{sa} 와 영구자석에 의한 자속

ϕ_{fa} 에 의해 발생된 공극자속이 a상 권선과 쇄교 함으로써 발생하는 유기기전력을 의미한다. 위 그림으로부터 계자자속에 의한 a상 유기기전력 $e_{fa} = \omega N_s \phi_f \cos \omega t = \sqrt{2} E_{fa} \cos \omega t [V]$ 로 되며 3상 입력으로부터 기계적인 힘으로 변환되는 입력전력 P_{em} 은 다음 식과 같이 주어진다.

$$P_{em} = 3E_{fa}I_a \cos(\delta - 90^\circ) [W] \quad (1)$$

기계적 출력 $T_{em}\omega_s = P_{em}$ 의 관계를 이용하면 토오크는 다음식과 같이 주어진다.

$$T_{em} = k_t \phi_a I_a \sin \delta [N] \quad (2)$$

단, $k_t = 3 \frac{N_s}{\sqrt{2}}$, N_s :상당 등가 권선수

식(1)로부터 일정 입력전류로부터 에너지 저장 시 최대 효율을 얻기 위해서는 입력전류를 유기기전력 E_{fa} 와 동상으로 제어하여야 한다. 본 연구에서는 전기자 전류에 의한 자속 ϕ_{sa} 는 ϕ_{fa} 에 비해 매우 작은 것으로 가정하여 $\phi_{fa} = \phi_{gap, a}$ 로 놓고 회전자 위치를 검출 함으로써 유기기전력의 위상기준값으로 하여 제어하였다.

한편 회전 운동에 대한 기계적 운동 방정식은 식 (3)과 같이 된다.

$$T_E = J \cdot \frac{d\omega_m}{dt} + B \cdot \omega_m \quad (3)$$

단, J : 로터와 휠의 관성 모멘트[kg·m²]

B : 마찰계수

ω_m : 회전각속도[rad/sec]

4. 전력변환기 제어

• PWM방식의 선정

1)구형파 PWM을 사용한 인버터 출력전압 제어 제어회로의 구성이 가장 간단한 장점은 있지만 출력전류의 왜곡이 심하여 토오크 리플이 큰 단점이 있다. 본 연구에서는 PLL이 동작하여 정현파 기준값을 얻기 전 약 2400[RPM]까지는 이 방법을 사용하여 휠을 가속하였다. 6절에 동작파형을 실는다.

2)정현파 PWM을 사용한 인버터 출력전압 제어 출력전압의 정현파 기준값을 구하기 위한 별도의 회로가 추가되지만 토오크리플은 상당히 감소시킬 수 있다. 그러나 입력전류를 역기전력과 동

상으로 제어하는데 회로가 매우 복잡해짐으로써 어려움이 있다.

3)히스테리시스제어를 사용한 구형파 전류제어

히스테리시스 전류제어를 사용할 경우 입력전류의 기본과 성분은 역기전력과 동상으로 제어하는 것은 가능하지만 위의 1)항 보다 많은 상당한 토오크 리플을 갖게 된다.

4)히스테리시스제어를 사용한 정현파 전류제어

정현파 출력전류의 기준값을 얻기 위한 별도의 회로가 필요하지만 출력전류의 리플을 최소화 할 수 있고 위 3항과 같이 로터 위치로부터 역기전력을 가정할 경우 히스테리시스 전류제어를 사용하면 토오크 리플없이 매우 안정된 전류제어를 구현할 수 있다.

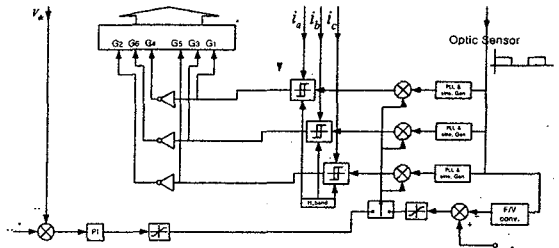


그림 3.인버터 전류 제어 블럭도

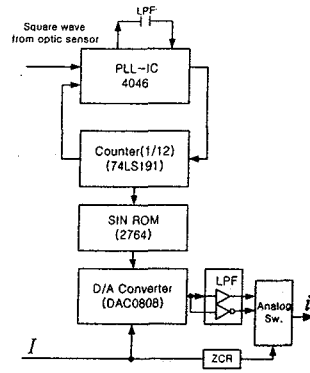
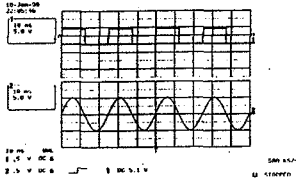


그림 4.인버터 출력 전류 기준값 발생회로

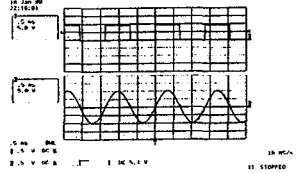
따라서 본 연구에서는 PLL과 Sin-ROM 테이블을 이용하여 정현파의 출력전류기준값을 얻고 히스테리시스 전류제어를 사용함으로써 저속과 고속에서 출력전류를 정현파로 제어하여 토오크리플을 최소화하는 고효율의 전력변환기를 설계 제

작하였다. 그림 3에서는 인버터 전류제어 블록도를 나타내며 그림 4에서는 인버터 출력전류 기준값 발생회로의 블록도를 나타내는데 아날로그 스위치와 D/A변환기를 응용하여 별도의 아날로그 곱셈기를 사용하지 않고 양부의 승산연산을 하도록 회로를 구성하였다.

그림 5에서는 정현파전류기준값의 실험파형을 나타내는데 설계된 PLL회로가 40[Hz]에서 730[Hz]의 넓은 범위에서 구형파 입력에 대해 정현파신호를 출력하고 있음을 알 수 있다.



(a)



(b)

그림 5. 40[Hz](a)와 730[Hz](b)에서의 PLL 동작

6. 실험 결과

그림 6에서는 초전도 플라이휠에너지 저장장치의 진공챔버를 보이고 있으며 그림 7에서는 전력변환기의 외관을 나타낸다.

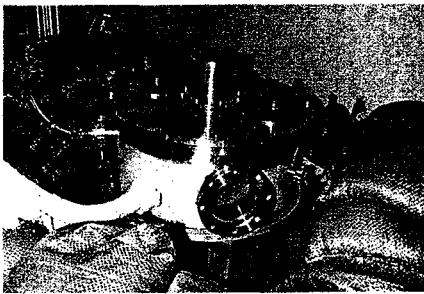


그림 6. 초전도 자기부상 베어링 FES

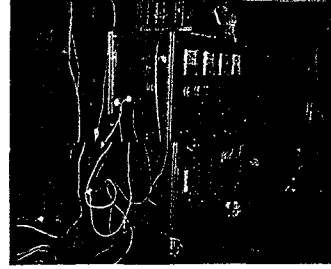


그림 7. 전력변환기

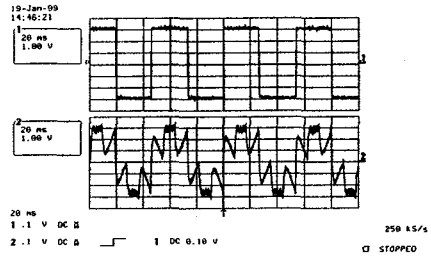


그림 8. 기동시 구형파 PWM에 의한 전류파형 (Rev.=1132[rpm])

그림 8에서는 기동시 구형파 PWM에 의한 출력전압기준파형과 전류파형을 나타낸다. 전류파형에 많은 고조파가 포함되 있음을 알 수 있다.

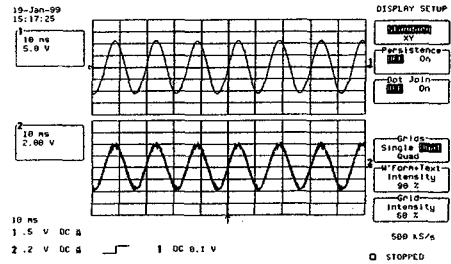


그림 9. 저장모드시 역기전력위상과 전류파형 (Rev.=4000[rpm])

그림 9, 10에서는 전력저장모드와 회생모드에서의 역기전력 위상과 출력전류 파형을 나타내고 있는데 저장모드에서는 동상으로 회생모드에서는 180도의 위상차를 갖는 정현파로 제어되고 있음을 알 수 있다.

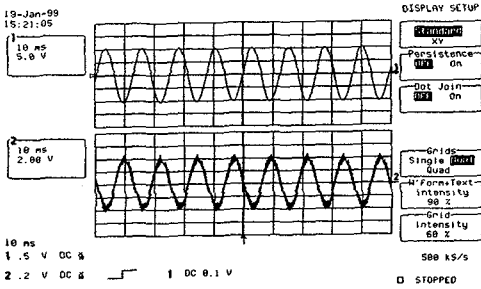


그림 10. 회생모드시 역기전력위상과 전류파형 (Rev.=5000[rpm])

그림 11~13에서는 무부하시 전류파형과 회생시 직류전압파형, 인버터출력전압 파형을 각각 나타내고 있는데 히스테리시스 전류제어의 특성상 약간의 전류리플이 발생함을 알 수 있으며 직류전압은 회생시 400[W]의 부하에서 100[V]로 일정하게 제어되고 있음을 알 수 있다.

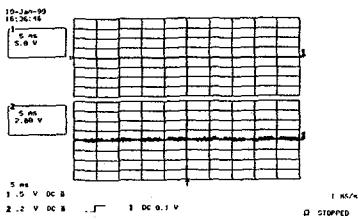


그림 11. 무부하 시 전류기준치와 출력전류

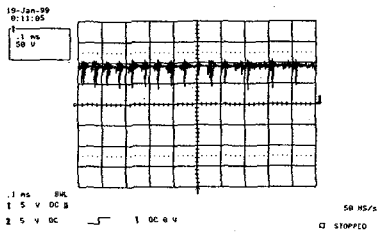


그림 12. 직류 전압출력(400[W]저항부하, PI제어)

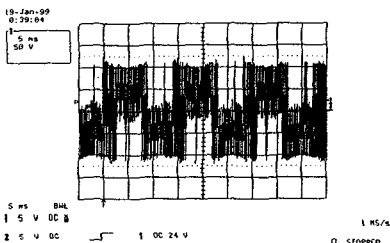


그림 12. 인버터 출력전압 파형

7. 결론

플라이휠에너지 저장시스템을 위한 전력변환기를 설계제작 하였다. 높은 보자력을 나타내는 Nd-Fe-B 영구자석을 사용한 Halbach배열의 계자를 갖는 영구자석 동기전동기의 경우 전기자반작용을 무시할 수 있고 따라서 회전자의 위치로부터 역기전력 위상을 가정하였다. 이러한 가정으로부터 인버터 출력전류는 역기전력과 동상의 정현파로 제어되도록 인버터 출력전류를 히스테리시스 전류제어기법을 사용하여 동상으로 되도록 제어기를 설계하였으며 고속의 엔코더사용이 제한적이므로 별도의 광센서를 사용하였다. 센서로부터의 입력이 구형파 출력이므로 구형파 출력으로부터 동상의 정현파 신호를 얻기위한 PLL회로를 설계하였다. PLL회로는 40[Hz]에서 730[Hz]까지의 넓은 범위에서 동작하였다.

제한된 전력변환기와 제어회로는 7000[RPM]에서 400[W]/25[sec]의 전력을 제안된 제 조건을 만족하며 전력을 회생함으로써 우수함을 증명하였다. 추후 전력변환기에서의 손실과 고조파 전류에 의한 전동/발전기 손실을 고려하여 회전속도에 따른 효율적인 스위칭 방식의 적용에 관한 연구가 수행 되어야 할 것으로 보인다.

참고문헌

- [1] Richard F. Post, et. al., "A High-Efficiency Electromechanical Battery," Proc. of IEEE, vol. 81, no. 3, pp. 462-474, 1993.
- [2] Shirou Nakamura, "Flywheel Technologies and High Tc Superconductivity," ISTE Journal, vol. 6, no. 1, pp. 43-50, 1993.
- [3] S. Zannella, et. al., "High-Tc Superconducting Magnetic Bearings for Rotation-Based Devices," IL NUOVO CIMENTO, vol.16D, no. 12, Dec., 1994.
- [4] Hidekazu Teshima, "Ring-shaped Flywheel Energy Storage Systems with Superconducting Levitation," in Proc. of PCC-Nagaoka '97, pp. 701-706.
- [5] Hull, J., et al., "Revolutionary Bearing Creates Efficient Energy Storage Device," Logos, vol. 12, no. 1, 1994.