

초고속 플라이휠 에너지 저장시스템을 이용한 Off-line UPS 제작

정환명, 최재호

충북대학교 공과대학 전기전자공학부

Designing for the Off-line UPS using SMB Flywheel Energy Storage System

H. M. Jeoung, J. H. Choi

School of Electrical and Electronics Engineering, Chungbuk National University

ABSTRACT

This paper presents a designing for the Off-line UPS using SMB Flywheel Energy Storage System. This described flywheel energy storage system is designed to replace of the conventional EMB(Electro Mechanical Battery) system. To realize the high efficiency and to minimize the torque ripple, the waveform of the inverter output current is controlled to be sinusoidal. The actual performance of the Off-line UPS using flywheel energy storage system is described. The prototype device was manufactured. The experimental result has good characteristics at a time of power transition region and regeneration modes.

1. 서론

본 논문에서는 초전도 베어링 (SMB:Super-conductive Magnetic Bearing)을 갖는 플라이휠 에너지 저장 시스템(FES:Flywheel Energy Storage)을 이용한 Off-line 방식의 UPS(Uninterruptable Power Supply)시스템에 관해 연구하였다. 최근 전산기기사용의 증가로 인해 안정된 전력환경이 더욱 요구됨에 따라 UPS의 사용도 증가하고 있으며 대부분의 UPS에서 현재 에너지 저장매체로써 사용되는 것은 연축전지 이다 연축전지의 경우, 효율이 약60[%]로 낮고 유해가스를 발생하며 재사용시 비용이 증가하고 주기적으로 교체하여야 하는 단점이 있었다. 플라이휠 에너지 저장시스템은 잉여의 전력을 회전체의 회전관성에너지로 변환하여 저장한 다음 필요시 회생동작을 통해 사용하게 되는데 이러한 에너지 저장시스템은 반복사용에 대해 수명이 반 영구적이며 유지보수가 필요 없고 유해가스

를 발생하지 않아 환경 친화적이라는 장점이 있으나, 휠 재료, 베어링, 전동발전기, 전력변환기, 진공 문제등 수반되는 부분이 모두 초고속, 저손실로 운전되어야하는 어려움을 이유로 상품화하는데 어려움이 있다. 최근 관련분야연구개발은 활발히 진행되고 있으며^[1,2] 특히 초전도체 위에서의 영구자석의 부상력을 이용한 베어링을 사용할 경우 매우 높은 효율의 안정된 베어링 제작이 가능해짐에 따라 새로운 관심을 갖게 되었다^[3]. 한편 이러한 베어링을 사용하였을 경우 베어링 손실은 2%/일로 매우 낮은 것으로 보고되고 있다.

따라서 본 논문에서는 베어링 부분에 초전도 자기부상 베어링을 갖추고 초고속의 영구자석동기전동기를 사용하여 고효율의 플라이휠 에너지 저장시스템을 실현하고자 하였으며 이를 이용한 Off-line 방식의 무정전 전원장치를 제작하고 실험결과를 나타냄으로써 제안된 플라이휠 에너지저장 시스템이 UPS로써 응용될 수 있음을 보였다.

2. 시스템 구성

2.1 전시스템 구조

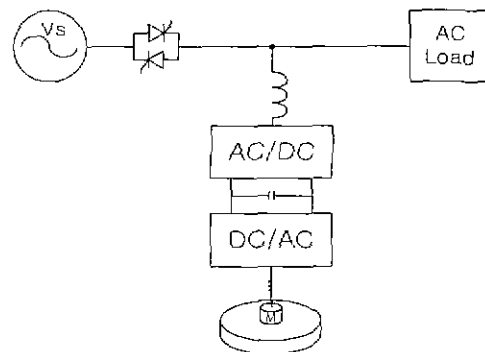


그림 1 제안된 시스템 구조

Fig. 1 Proposed system structure

그림 1에서는 제안된 FES를 이용한 1상 Off-line UPS의 구성을 나타내고 있다. 이러한 유형의 UPS는 과도상태를 갖지 않는 순시 무정전 전원절환에는 어려움이 있지만 6브릿지 모듈의 단일변환기와 부스트-업 기능을 위한 입력 인덕터만을 가지고 컨버터로 동작시 입력전류를 입력전압과 동상의 정현파로 제어하고 인버터로 동작시 출력전압을 정현파로 제어할 수 있는 장점이 있다.

2.2 초전도 플라이휠 에너지 저장시스템

그림 2에서는 덩어리형 고온 초전도체를 사용한 플라이휠 에너지 저장시스템의 구성요소와 진공 챔버내의 단면도를 나타내고 있다. 외전형의 PMSM(Permanent Magnet Synchronous Motor)이 휠 상부에 위치하고 있으며 진공 챔버내의 가장 아래에 위치한 것이 고온초전도체이고 휠 아래부분에는 부상을 위한 영구자석이 배치되어있다.

Meissener 효과와 pinning 효과에 의해 휠 하부에 영구자석을 갖는 플라이휠은 액체질소온도까지 냉각된 초전도체 위에서 안정된 부상특성을 나타내게 되며 고속 회전시 매우 낮은 베어링 손실특성을 보이게 된다.

본 연구에서 설계한 휠은 무게 15[Kg], 관성모멘트 0.098[Kgm²], 최대 회전수 42,000 [RPM]의 SUS급속을 사용하였으며 최대 저장에너지는 240[Wh]가 된다.

2.3 전동발전기

플라이휠에너지 저장시스템에서 전기적인 에너지를 기계적인 에너지로 혹은 그 역으로 변환하는데 있어서 중요한 요소는 전동/발전기이다. 또한 고속화에서 가장 큰 문제는 손실에 의한 열발생 문제이며 권선에 의한 동손 I^2R 이외에도 철손의 증가를 들 수 있으며 철손 중 와류손은 주파수에 비례하게 되고 히스테리시스 손실은 주파수의 제곱에 비례하는 코어손실을 발생하게 되어 철심제작에 많은 어려움을 겪게 된다. [6][1] 본 논문에서는 Hallbach Array 영구자석 배열을 갖고 전기자에 공심구조를 갖는 외전형의 PMSM을 선정하였다. 영구자석 재료로써 Nd-Fe-B를 사용하여 Hallbach 배열을 구성하였기 때문에 원통 내부에서 고밀도의 일정한 자속 밀도를 얻음으로써 높은 토크를 발생할 수 있게 하였으며 전기자에 공심코어를 사용함으로써 철손을 최소화 하였다.[1]

그림 3에서는 동기전동기의 a상에 대한 등가회로와 페이저도를 나타내고 있다. $E_{gap,a}$ 는 전기자 전류에 쇄교자속 ϕ_{sa} 와 영구자석에 의한 자속 ϕ_{fa} 에

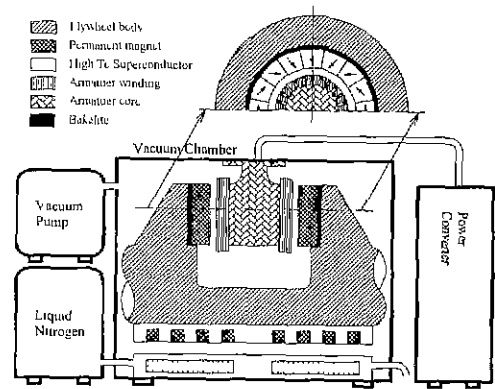


그림 2 에너지 저장장치 단면도
Fig. 2 Cross-sectional view of the HTS magnet FES system.

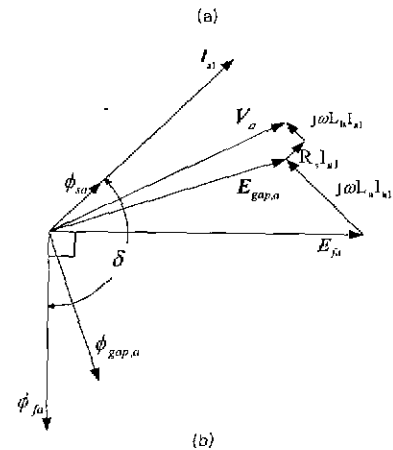
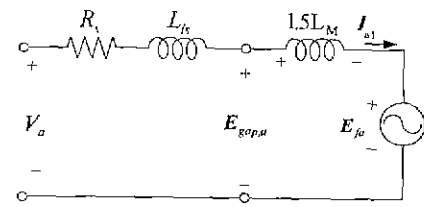


그림 3 (a) a상 등가회로
(b) 페이저도

Fig. 3 (a) Equivalent circuit for phase a.
(b) Phasor diagram.

의해 발생된 공극자속이 a상 권선과 쇄교함으로써 발생하는 유기기전력을 의미한다. 그림 4(b)로부터 계자 자속에 의한 a상 유기기전력 e_{fa} 는 아래와 같이 주어진다.

$$e_{fa} = \omega N_s \phi_f \cos \omega t = \sqrt{2} E_{fa} \cos \omega t [V] \quad (2)$$

그림 3으로부터 3상 입력으로부터 기계적인 힘으로 변환되는 전력 P_{em} 은 식 3과같이 주어지며 모터 입력전류가 역기전력과 동상으로 제어 될 때 최대의 출력을 얻을 수 있음을 알 수 있다.

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

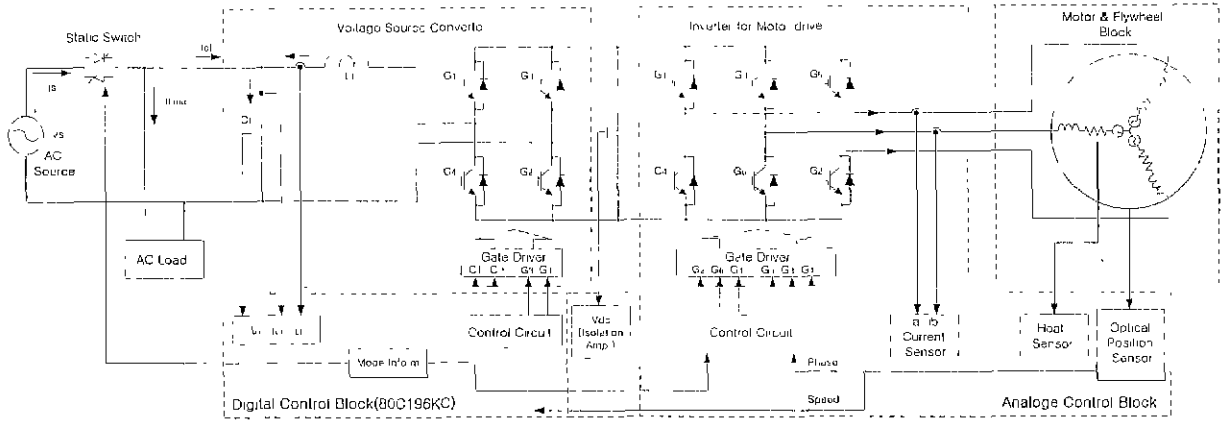


그림 4 전력변환시스템 블록도
Fig. 4 Power converter block diagram

3. 전력변환기 제어

그림 4의 우측부분에서는 기존의 연속전자를 대체할 목적으로 FES가 EMB(Electro Mechanical Battery)로써 동작할 수 있도록 구성된 주 전력회로와 제어를 위한 피드백을 나타내고 있으며 좌측 부분은 단상 전원 계통과 부하에서 Off-line UPS로 동작하기 위한 전압형 컨버터의 구성과 제어 블록도를 나타내고 있다.

에너지 저장모드에서 부하전류와 컨버터 입력전류는 Static SW.를 통해 전원에서 공급하게 되며 이 때 전압형 컨버터는 전원에서부터 전력을 공급받아 직류단에 일정 직류전압을 유지하도록 제어된다. 모터드라이브를 위한 인버터는 휠의 회전속도가 정격속도가 될 때까지 가속하도록 제어되어 전원의 전기적인 에너지를 기계적인 에너지로 저장하게 된다. 휠의 회전속도가 최대 정격속도까지 접근하면 저장모드는 해제되며 대부분의 전류는 전원에서 부하로 흐르게 된다.

전원전압에서 정전이나 전압강하 등의 비정상적인 요인이 검출되면 전력변환기는 회생모드로 동작하게 되는데 Static SW.를 Off시키고 전압형 컨버터는 교류정현파 전압을 출력하도록 제어되며 인버터는 교류측에 전동발전기의 역기전력과 180도의 위상차를 갖는 정현파전류가 흘러 직류측에 일정직류전압을 유지하도록 제어된다.

컨버터제어를 위한 제어회로는 저가의 마이크로프로세서인 80C196KC를 이용하여 구현하고 있다. 전동발전기 최대 운전 속도는 약 40000[RPM]으로 기본주파수는 약 660[Hz]에 이르게된다. 차후 더 높은 운전속도를 감안하면 이와 같이 높은 주파수 영역에서의 운전은 디지털 제어의 연산지연과 관련하여 어려움이 있을 것으로 예상되며 더욱이 전동발전기의 입력전류를 넓은 주파수범위에서 정현파전류로 제어하기 위해 제어회로는 아날로그회로로

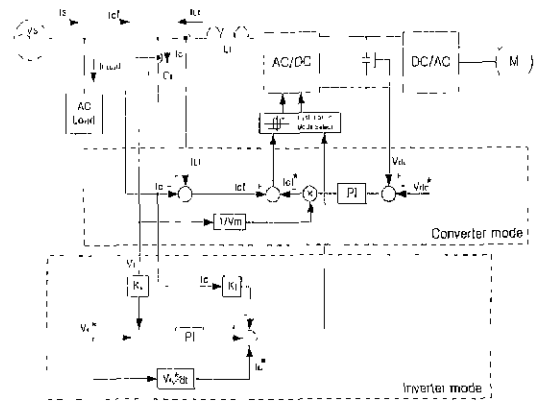


그림 5 전압형 컨버터 제어
Fig. 5 Control of Voltage source converter

구성하였다.

그림 5에 컨버터를 제어하기위한 블록도를 나타낸다. 컨버터 모드에서 제어기는 일정 직류전압 V_{dc} 을 유지하도록 제어되는데 필터 커패시터 전류 i_{cf} 와 인덕터 전류 i_{Lf} 의 순시치가 전원전압 v_s 와 동상의 정현파가 되도록 제어한다. 직류전압 기준값 V_{dc}^* 과 피드백값 V_{dc} 의 에러의 PI응답을 구하고 전원과 동상의 위상을 곱하여 커패시터 앞단의 전류 i_{cf}^* 기준값으로 한다. 인덕터 전류에서 커패시터 전류를 제외하면 커패시터 앞단의 전류를 피드백한 값이 되며 앞에서 구한 전류기준값의 차를 히스테리시스 전류제어기입력으로 하여 전류 기준값을 추종하도록 한다.

인버터 모드는 크게 커패시터 기준전류값 i_c^* 제어를 위한 루프와 교류전압제어 v_c 를 위한 루프로 구성된다. 커패시터 전류의 기준값은 교류전압기준값의 미분치가 되며 i_c 를 직접 피드백한 값과 비교되게 된다. 그림 5에서 보는 바와 같이 히스테리시스 제어기의 입력은 전류기준값과 전압에러의 PI 출력의 합과 커패시터 전류의 차가 된다.

4. 실험결과

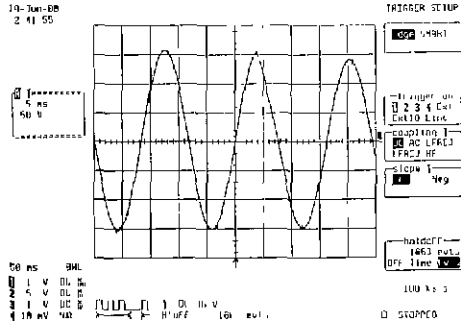


그림 6 정전발생시 과도상태 교류전압
Fig. 6 AC load voltage in power fault

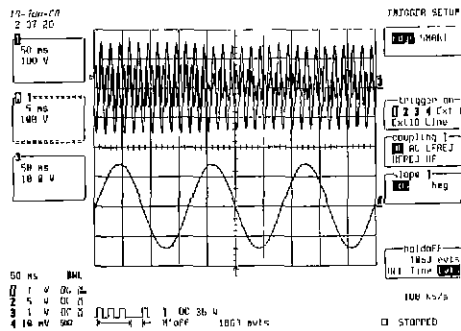


그림 7 회생모드에서의 부하전압
Fig. 7 Load voltage in regeneration mode

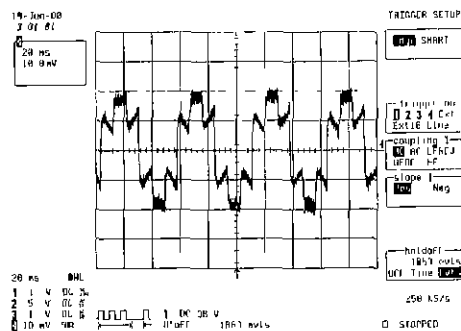


그림 8 초기 기동상태서 모터 입력 전류
Fig. 8 Motor current in starting mode

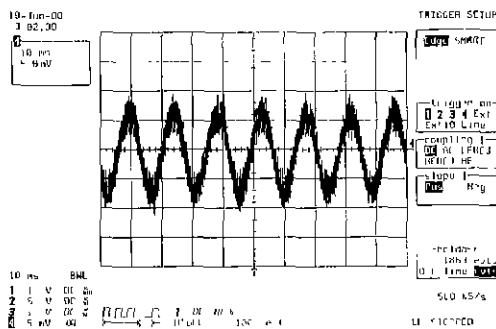


그림 9 정상상태에서의 모터 입력 전류
Fig. 9. Motor current at normal state

그림 6에서는 전압이상 발생시 교류저항부하 양단의 전압을 보여주고 있는데 중앙 우측의 첨두부분이 정전발생점을 나타내며 약 1/4주기 안에 교류정현파전압이 컨버터에 의해 제어되고 있음을 나타낸다. 그림 7의 상부파형에서는 과도상태와 전후를 포함한 약 30주기에서의 교류 출력전압을 보여주고 있으며 어느정도 전압 옵셋조정이 필요한 상태이다. 하부 파형은 정전 발생 후 약 10주기 경과 후의 전압으로 안정된 있음을 알 수 있다.

그림 8과 그림 9에서는 PLL회로가 정상동작하기 전 낮은 RPM에서 구형파 PWM에 의한 모터 입력 전류 파형과 고속에서 PLL회로가 정상적으로 동작하는 경우의 모터 입력전류파형을 나타내고 있다. 입력전류가 정현파로 제어되고 있음을 볼 수 있다.

5. 결론

본 논문에서는 최대 240[Wh]의 용량을 갖는 초전도 플라이휠 에너지 저장시스템을 이용한 Off-line UPS의 제작에 관한 연구를 수행하였다. 전동/발전기에는 계자에 Halbach 배열을 갖는 원통형 영구자석 동기전동기를 제작하고 실험하였으며 전력변환기는 토오크리플을 최소화하고 고효율을 실현하기 위해 모터 입력 전류를 역기전력과 동상 또는 180도의 위상을 갖는 정현파로 제어 하였다.

Off-line UPS에 적용하기 위한 전력변환기를 설계하고 시작품을 제작하였으며 정전발생시 교류부하의 전압파형이 위상 변동없이 정현파 전압으로 제어됨을 보임으로써 기존의 배터리를 사용한 단점을 개선하여 에너지 저장시스템으로 사용할 수 있음을 알 수 있었다.

차후 전압의 옵셋 에러를 수정하고 정류기 부하와 같은 비선형 부하에 대한 제어특성을 개선하며 전 속도 영역에서의 시스템 효율에 관한 연구를 계속할 계획이다.

참고 문헌

- [1] Richard F Post, et. al, "A High-Efficiency Electro-mechanical Battery," Proc. of IEEE, vol. 81, no. 3, pp. 462-474, 1993.
- [2] Hull, J, et al, "Revolutionary Bearing Creates Efficient Energy Storage Device," Logos, vol 12, no. 1, 1994.
- [3] Shirou Nakamura, "Flywheel Technologies and High Tc Superconductivity," ISTEC Journal, vol. 6, no. 1, pp 43-50, 1993.
- [4] 정환명, 연제욱, 최재호, 고창섭, "초전도 플라이휠 에너지 저장시스템 개발", 전력전자학회 논문지 Vol.4, No.5, pp 433-441, 1999년 10월