

## 초전도 플라이휠 에너지 저장시스템 개발

鄭煥明, 延濟旭, 崔載昊, 高彰燮

## Development of a Flywheel Energy Storage System using Superconducting Magnetic Bearing

Hwan-Myoung Jeoung, Jae-Wook Yeon, Jae-Ho Choi, Chang-Seop Koh

## 요 약

본 논문에서는 기존 축전지를 대체하기 위한 초전도 플라이휠 에너지 저장시스템에 관해 연구 하였다. 전동/발전기, 베어링, 휠재료, 전력변환기등의 설계요소에 관해 기술하였으며 초고속의 회생 및 저장 모드에서 모터입력전류를 정현파로 제어하기 위한 전력변환기를 설계 제작하였다. 높은 보자력을 갖는 희토류 영구자석을 사용하여 계자를 구성하는 원통형 영구자석 동기전동기를 사용함으로써 고효율을 실현하고자 하였다. 기계적 베어링과 초전도 자기부상 베어링을 사용하는 시스템에 적용하여 운전하였으며 후자의 경우 약 10,000[rpm]에서 매우 안정된 회전 특성을 보였으며 전자의 경우 설계 특성을 만족하면서 7,000[rpm]에서 100[V]의 일정 직류전압으로 약 25초 동안 400[W]의 전력을 회생하였다.

## ABSTRACT

This paper presents a S-FES(Superconducting magnetic bearing Flywheel Energy Storage System) for the purpose of replacing battery used to store the energy. Especially, the design elements of FES, such as the bearing, wheel material, and power converter, etc., are described. The design and manufacturing techniques of the controllable power converter are proposed to generate the sinusoidal output current in the high speed operation and to get the constant DC voltage in the regeneration mode. The cylindrical permanent magnet synchronous motor with halbach array of high coesive Nd-Fe-B permanent magnet is used as the driver of FES. The proposed S-FES system shows the stable rotation characteristics at high speed range about 10,000[rpm]. To verify the validity of proposed system, the comparative study with the conventional ball bearing system is proceeded and it is well confirmed with the result of the lower friction losses of S-FES system.

**Key Words** : Flywheel energy storage system, Superconducting magnet bearing, High-speed motor drive.

## 1. 서 론

최근 하절기 냉방기기의 사용증가 등으로 인해 하루 중 일정시간대에 전력사용이 집중하는 현상은 날로 증가하고 있으며 이는 계통에 있어서의 순간정전이나 전원전압의 감소, 유도성 부하에 기인한 부효전력의 증가 등으로 이어져 전력환경의 불안정한 요소로 작용하

고 있다.<sup>16)</sup> 한편 각종 전산기기 사용도 더욱 증가하고 있으며 컴퓨터와 같은 전산기기는 1~2초 미만의 순간 정전사고에 의해서도 막대한 손실을 초래할 수 있으므로 무정전전원장치의 사용도 더욱 증가하고 있는 추세이며 보다 안정된 전원환경이 필요하게 되었다. 무정전 전원장치와 같은 전력저장장치에서 현재 가장 많이 사용되고 있는 것은 연속전지이며 연속전지는 전반적

으로 가격은 낮지만 무게가 무겁고 효율이 60[%] 정도로 낮으며<sup>[11]</sup> 재생시 필요한 별도비용이 소요되며 환경적측면에서 보면 사용시 유해가스를 발생하며 반복사용시 수명한계가 짧은 등의 단점을 가지고 있다. 한편 이러한 연속전지가 가지고 있는 단점을 보완하기 위한 대안으로 플라이휠 에너지 저장시스템을 들 수 있다.<sup>[1, 2]</sup> 이러한 에너지 저장시스템은 반복사용에 대해 수명이 반영구적이고 오염물질을 발생하지 않아 환경친화적이며 연속전지와 비교하여 단위무게당 저장에너지가 많다는 장점은 있지만 풍손과 베어링 마찰손으로 인한 기계손이 증가하여 효율이 낮고 베어링 수명에 따라 유지 보수를 해야하는 단점을 안고 있기 때문에 일부 특수목적용 제외하고는 실용화에 어려움이 많은 실정이다.<sup>[10]</sup>

따라서 이러한 단점을 해결하고 마찰이 작은 고효율 베어링의 구현을 위해 축방향으로는 영구자석을 사용하고 반경방향으로 작용하는 힘을 잡아주기 위해서 자기 베어링을 사용하는 연구도 진행되고 있으나 고정밀도를 갖는 제어장치가 별도로 필요하게 된다. 또한 에너지 저장시와 회생시의 효율은 사용하는 모터/발전기에 종속적이며 따라서 고효율 모터를 사용하여야 하는 부담을 안고 있다. 따라서 최근 베어링손실에 관한 문제점을 해결하기 위한 노력으로 덩어리형 초전도체 위에서의 영구자석의 자기적 부상력을 이용한 플라이휠 에너지 저장시스템에 관한 연구가 활발히 진행되고 있으며 초전도 자기부상 베어링을 사용할 경우 에너지손실이 2[%/day]로 매우 낮은 것으로 보고되고 있다.<sup>[5]</sup> 초전도 자기부상 베어링은 덩어리형 고온 초전도체 위에서의 영구자석의 반발력을 이용하는 것으로 회전운동에 대해 매우 낮은 마찰특성을 보이고 있으며 반경방향으로의 진동도 억제하는 특성이 있다.

따라서 본 연구에서는 고효율의 플라이휠 에너지 저장시스템의 구현을 위해 초전도 베어링을 사용하여 베어링 마찰을 최소화하였으며 전동/발전기에 대해서는 높은 잔류자속밀도를 갖는 Nd-Fe-B자성체를 사용하여 Halbach 배열로 알려진 영구자석배열을 사용하여 일정하고 높은 공극자속밀도를 실현한 고효율의 원통형 영구자석동기전동기를 사용 하였다. 전력변환기는 모터입력주파수가 약40[Hz]-700[Hz]까지 전동발전기의 토오크리플을 최소화하고 고효율을 실현할 수 있도록 정현파 전류로 제어하도록 제어회로를 설계하고 전력회생시에는 직류전압을 일정하게 제어함으로써 기존의 배터리를 사용하는 무정전 전원공급장치 등에 직접 적용하여 배터리를 대체할 목적의 시스템을 설계하였다. 이와 같은 플라이휠 에너지 저장시스템설계를 위한 제반 여건에

관해 기존 개발사례를 중심으로 알아보고 실제시스템의 구현을 통해 동작특성을 확인하여 에너지 저장시스템으로써의 가능성을 입증하는 연구를 수행하였다.

## 2. 플라이휠 에너지 저장시스템 개요

그림 1에서는 플라이휠 에너지 저장시스템 설계에 있어서 주요하게 고려해야할 항목을 나타낸 것이다. 먼저 많은 에너지를 고효율로 저장하거나 회생하기 위해서는 휠재료, 전동/발전기, 베어링, 전력변환기등이 모두 고속회전 또는 운전이 가능하고 고효율로 동작하도록 설계하지 않으면 안된다. 가령 수십만 rpm의 회전이 가능한 재료라 하여도 전동/발전기 정격에 맞추기가 어렵고 기계손실인 베어링 손실 및 풍손이 증가할 것이고 전력변환기에 의해 교류 전류를 정현파가 되도록 제어하는데 어려움이 뒤따르게 되므로 전체 시스템조건을 고려하여 설계하여야 한다.

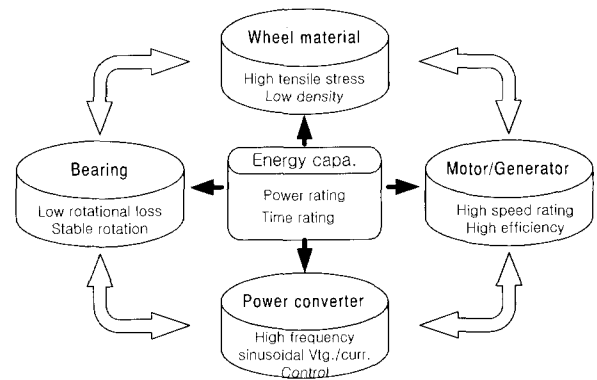


그림 1 플라이휠 에너지 저장시스템의 구성요소  
Fig. 1 Construction element of Flywheel Energy Storage System

그림 2에서는 플라이휠 에너지 저장시스템의 응용 가능한 예를 나타내고 있는데 배터리가 전력저장시스템에서 응용된 예로부터 유추가 가능하다. 그림 2(a)는 전형적인 On-Line UPS로서 전원으로부터 항상 여분의 전력을 휠의 기계적 운동에너지로 저장한 다음 전원의 정전이나 전압 새그(sag)발생시 휠의 기계적 에너지를 전기에너지로 변환하여 부하에 안정된 전력을 공급하게 된다.

그림 2(b)는 능동전력필터APF에 적용할 경우를 보여주는데 정류기 혹은 유도부하와 같이 고조파와 무효전력을 발생하는 부하의 입력측에 고조파 전류와 무효전류성분을 계통에 주입하여 줌으로써 계통안정화를

도모할 수 있다.<sup>17)</sup> 그림 2(c)는 심야전력과 같은 잉여의 전력을 야간에는 휠을 가속함으로써 에너지를 저장하고 주간 부하 피크시에 계통에 전력을 회생함으로써 부하율(Load factor)을 감소시킴으로 전력예비율을 개선할 수 있게 됨으로써 전력환경을 개선할 수 있게 된다.

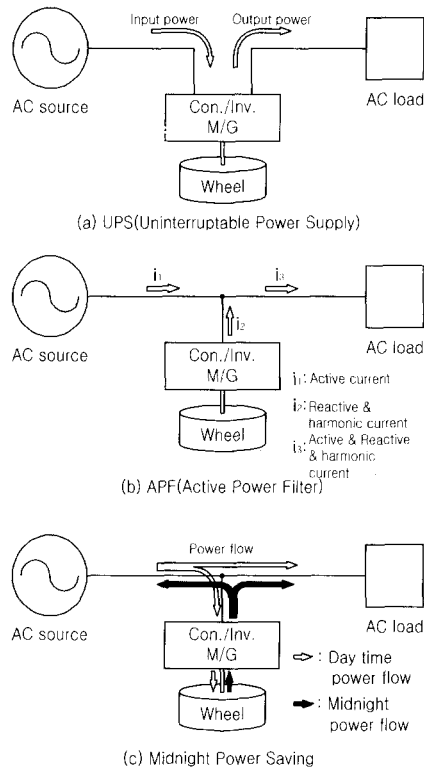


그림 2 플라이휠 에너지 저장시스템의 응용  
Fig. 2 Application of Flywheel energy storage system

### 3. 휠 재료의 선정 및 형상

그림 3과 같은 형상의 플라이휠에 있어서 반지름  $R[m]$ , 무게  $m[Kg]$ , 회전각속도  $\omega[rad/sec]$ 로 회전하는 회전체가 갖는 회전에 의한 관성에너지는 식 (1)과 같이 주어진다.<sup>12)</sup>

$$E = \frac{1}{4} m R^2 \omega^2 [J] \quad (1)$$

식 (1)에서 보는 바와 같이 회전운동에너지는 무게에 비례하고 반지름의 제곱, 회전속도의 제곱에 비례함을 알 수 있으며 베어링의 마찰력이 운동하는 물체

의 무게와 비례관계인 것을 함께 고려하면 무게보다는 속도와 반지름을 크게 하는 것이 유리함을 알 수 있다.

한편 이 때 원심력에 의해 물체에 작용하는 응력은  $R^2 \omega^2$ 에 비례하며 재료에 작용하는 최대 응력을  $\sigma_{max} [Pa]$ 로 놓고 단위질량 및 단위부피당 저장되는 에너지를 각각  $\lambda_m$ 과  $\lambda_v$ 로 나타내면 식 (2)와 같다.

$$\begin{aligned} \lambda_m &= K_s \cdot \sigma_{max} / \rho [J/Kg] \\ \lambda_v &= K_s \cdot \sigma_{max} [J/m^3] \end{aligned} \quad (2)$$

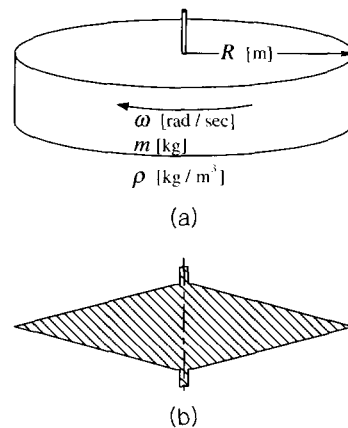


그림 3 (a) 평면 디스크 원판  
(b) 등방형 원판  
Fig. 3 (a) Plat disk plate  
(b) Isometric disk plate

식 (2)에서  $K_s$ 는 지형인자라써 회전체의 모든 부분에 작용하는 원심력의 크기가 같은 등방형 구조일 경우 1.0의 값을 갖으며 평판 디스크일 경우 0.606의 값을 갖는다. 식 (2)는 휠 재료의 최대 인장하중과 밀도를 알면 휠 크기나 속도에 관계없이 최대 저장에너지를 계산할 수 있음을 나타낸다.<sup>11,2)</sup>

지형인자를 0.5로 할 경우 E-glass Fiber의 경우 최대 인장응력을 3.5[GPa], 밀도  $\rho$ 를 2540[Kg/m<sup>3</sup>]으로 할 경우 단위 무게당 저장 에너지는 190[Wh/Kg]임을 알 수 있다.<sup>11)</sup> 저밀도 고강도 재료의 사용은 저장에너지를 증가시킨다는 의미 이외에도 휠 무게를 줄임으로써 베어링에서의 마찰손실을 줄일 수 있으며 전기자동차용 에너지 저장시스템에 적용할 경우 차체 무게를 경감시켜 효율을 극대화 할 수 있는 장점이 있다.

휠 구조에 있어서 원심력이 회전축 중심으로 집중되는 현상을 방지하기 위해 디스크형을 배제하고 링형...

로 하거나 휠을 여러 부분으로 분할하여 중심부에서 스프링을 이용하여 속도가 증가함에 따라 분리된 부분이 중심에서 멀어지게 설계하여 속도에 관계없이 일정한 전력을 입출력할 수 있는 연구도 진행되었다.<sup>[9]</sup>

그림 4는 본 실험에 사용한 플라이휠의 외형을 나타내고 있다. 위의 내용으로부터 에폭시나 그라파이트등이 휠 재료로써 적합함을 알 수 있지만 실험의 편리성을 위하여 본 연구에서는 금속으로 만든 플라이휠을 사용하고 있으며 휠의 최대회전속도는 40,000[rpm], 중량15[Kg], 관성모멘트0.0984[Kg-m<sup>2</sup>]이며 최대 저장에너지는 식 (1)을 이용하면 240[Wh]가 된다.

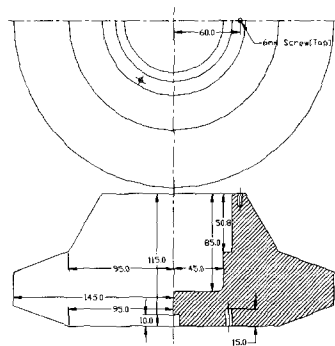


그림 4 플라이휠 부분  
Fig. 4 Component of Flywheel

#### 4. 베어링의 선정

단시간에 피크성 전력을 요하는 시스템에 있어서는 기계적 베어링을 사용하여도 효율에 있어서 그다지 큰 에너지 손실을 발생하지 않지만 UPS와 같이 항상 최대의 저장에너지상태로 회전하는 시스템에 있어서 베어링에 의해 발생하는 기계적 손실은 그 양이 작다고 하여도 회전하고 있는 동안 손실을 발생하게 되므로 시스템 전체 효율에 미치는 영향은 매우 크다고 하겠다. 자기적인 힘을 이용하는 경우가 기계적 베어링을 사용하는 경우보다 낮은 베어링 마찰특성을 보이므로 보조전원용 시스템에 적합할 것으로 보인다.

특히 영구자석의 덩어리형 고온 초전도체위에서의 부상력을 이용 할 경우 고가의 헬륨 대신 가격이 저렴한 액체질소를 사용함으로써 운용 단가를 낮게 할 수 있고 회전시 축방향 진동과 반경방향 진동을 동시에 잡아줄 수 있으며 회전손실은 2[%/day]로써 매우 낮고 고속에서 매우 안정된 회전 특성을 얻을 수 있는 것으로 보고되고 있다.<sup>[15]</sup> 그림 5(a)(b)에서는 영구자석과 초전도체사이에 작용하는 힘과 Pinning effect를 통해 영

구자석이 고온초전도체위에서 안정하게 부상하는 원리를 각각 보여주고 있다.<sup>[13]</sup> 중심부에서는 초전도체가 자속선을 밀어내기 때문에 초전도체와 영구자석간에 반발력으로 작용하며 Messiner 효과로 설명된다. 가장 자리부분에 분포된 영구자석의 자속선은 Pinning Center에 의해 구속된다. 따라서 상하방향으로는 부상력에 의해 반경방향으로는 Pinning 효과에 의해 각각 잡아주게 되며 따라서 안정된 위치를 유지하게 된다. 한편 고온초전도체의 동작온도와 반발력의 증대를 위한 연구는 국내외에서 계속하여 발전하고 있으며 베어링으로써의 연구도 점차 확대될 것으로 보이고 있다.<sup>[14]</sup>

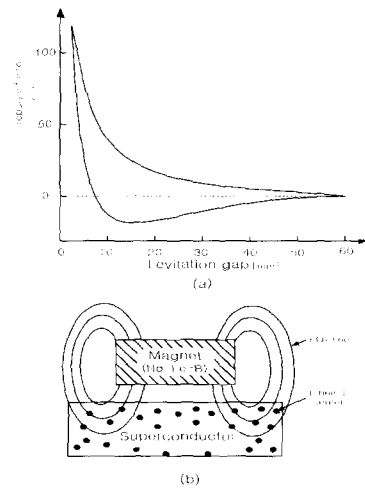


그림 5 (a) 영구자석의 부상력 특성  
(b) Pinning 효과  
Fig. 5 (a) levitation characteristics  
(b) Pinning effect

#### 5. 전동/발전기의 선정 및 설계

##### 5.1 전동/발전기 선정

플라이휠에너지 저장시스템에서 전기적인 에너지를 기계적인 에너지로 혹은 그 역으로 변환하는데 있어서 중요한 요소는 전동/발전기이다. 플라이휠에 적용하여 연구된 예로는 유도기, 동기기, 영구자석형 동기전동기, 릴럭턴스 전동기를 들 수 있으며 어느 경우이건 고속 고효율을 목표로 연구 개발되고 있다.<sup>[11]</sup>

고속화에서 가장 큰 문제는 손실에 의한 열발생 문제이며 권선에 의한 동손 I<sup>2</sup>R이외에도 철손의 증가를 들 수 있으며 철손 중 와류손은 주파수에 비례하게 되고 히스테리시스 손실은 주파수의 제곱에 비례하는 코어손실을 발생하게 되어 철심제작에 많은 어려움을 겪게 된다. 특히 수만 혹은 수십만의 초고속모터의 실현

에서는 공심코어의 설계가 불가피하게 되며 실링 공심 코어로 제작하여 코어손실을 0으로 하여도 공심코어의 열전달특성이 양호하지 않고 진공상태이므로 동손에 의한 발생열을 외부로 유출하기 위한 장치가 고려되어야 한다.

시스템 제작에 있어 가장 편리하게 구현할 수 있는 형태로 유도전동기를 들 수 있다. 이 경우 전력의 저장과 회생은 유도전동기의 슬립전력 제어만으로 할 수 있으므로 제어가 간단하고 전동기 제작단가가 저렴하여 구성하기는 쉽지만 고속에서 고효율을 실현하기는 용이하지 않은 현실이다. 유도전동기를 사용한 사례에서 효율은 80[%] 미만으로 나타났다.<sup>[11]</sup>

릴럭턴스 전동/발전기의 경우 구조가 간단하고 튼튼하기 때문에 초고속회전이 가능한 장점이 있다. 한편 효율 90%이상의 특성을 나타낼 수 있는 릴럭턴스 전동기 제작도 가능한 것으로 알려져 있으며 영구자석을 사용하는 PMSM(Permanent Magnet Synchronous Motor)보다 저렴하게 구현할 수 있을 것으로 보인다. 그러나 릴럭턴스 전동기의 경우 큰 토오크를 얻기 위해 공극(Air-gap)의 폭이 좁아야하지만 초전도 플라이휠의 경우 회전체가 외부와 기계적으로 단단하게 고정된 것이 아니기 때문에 시동시 회전체는 무게 중심이 아닌 자계중심으로 회전하게 되며 따라서 어느 정도의 진동은 불가피하게 된다. 이러한 측면에서 릴럭턴스 전동기를 초전도 플라이휠 에너지 저장 시스템에 적용하기 위해서는 축 반경방향진동을 잡아주기 위한 별도의 베어링을 설치하여야 하며 또한 회전속도가 증가함에 따라 회전자 절단부분에서의 히스테리시스 손실과 와류손실은 더욱 증가하게 되어 본 시스템에 적용하기는 곤란하게 된다.

따라서 본 논문에서는 위에 열거한 전동기/발전기의 단점을 극복하고 초고속에서 고효율을 실현하기 위해서 Hallbach Array 영구자석 배열을 갖고 전기자에 공심구조를 갖는 외전형의 PMSM을 선정하였다.

본 연구에서 사용된 전동/발전기의 경우 영구자석 재료로써 Nd-Fe-B를 사용하여 Hallbach 배열을 구성하였기 때문에 원통 내부에서 고밀도의 일정한 자속 밀도를 얻음으로써 높은 토오크를 발생할 수 있어 공극설계에 있어서 여유가 있으므로 어느 정도 휠의 반경방향 진동에 대해 안정화를 도모할 수 있고 자기회로는 영구자석만으로 구성되기 때문에 손실은 코어손실 없이 동손만으로 나타나게 된다.<sup>[11]</sup>

5.2 전동/발전기 설계

Hallbach 배열의 기본 개념은 자화벡터 방향을 축에

따라 연속적으로 회전시키는 형태로 영구자석편을 연속자화를 시킴으로써, 필요한 형태의 자계 분포를 얻는 것으로 1979년 Klaus Halbach에 의해 제안된 자기회로 구성법이다. 그림 6의 (a)는 16개의 자석편으로 구성된 Halbach배열의 개념도이며, (b)는 Halbach 배열의 개념을 영구자석 계자에 적용한 사례이다. 그림 6의 (b)와 같이 자화 벡터가 영구자석의 배열을 따라 연속적으로 회전하게 되면, 배열 내부에는 높고 균일한 자속밀도가 형성되며 영구자석만으로 폐자로를 구성할 수 있어 고속회전시 발생하는 와류손과 히스테리시스 손이 발생하지 않는다.

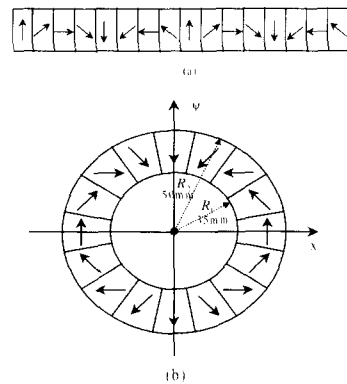


그림 6 (a) 16편 Halbach 배열 개념도  
(b) Halbach 배열 계자 모델  
Fig. 6 (a) A concept of 16-segment Halbach array  
(b) Field magnet using Halbach array

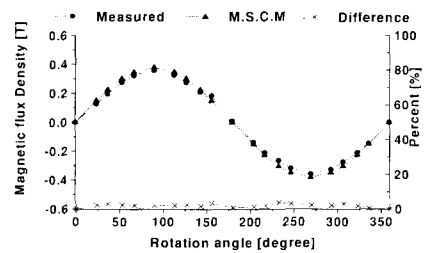


그림 7 계산치와 측정치 비교  
Fig. 7 Measured vs. Calculated

본 논문에서 구성한 영구자석을 이용한 Halbach 배열은 축방향 길이에 비하여 자석 계자의 직경이 크기 때문에 유한 요소법에 의한 2차원 근사화가 어렵기 때문에 Magnetic Surface Charge Method(이하:MSCM)를 이용하여, Halbach 계자내의 자계 분포를 해석하였다. 그림 7은 실제 조립하여 측정된 자속밀도값과 계산되어진 자속밀도값이다.

MSCM를 이용하여 Halbach 배열의 자계분포를 정확히 해석함으로써 모터설계에 필요한 자속량을 정확히 계산하였으며 표 2와 표 3은 각각 플라이휠 에너지 저장장치를 위한 모터 사양과 설계결과값이다.

표 1 설계사양  
Table 1 Design parameters

최대회전속도	40,000[rpm]
운전속도 범위	30,000~15,000[rpm]
인가전압(Vt)	220[V]
기동시간(min)	5분
감속시간(min)	5분

표 2 모터설계 결과  
Table 2 Motor parameter

항 목	설 계 결 과
기 동 토크 [KgCm]	14.1
정 격 토크 [KgCm]	5.287
극당유효 자속량 [Mx]	88600
평균자속밀도 [T]	0.3489
상당권 회수 [Turn]	96
토크 상 수 [KgCm/A]	1.7034
유기기전력상수[V/rpm]	0.0057
구 속 전 류 [A]	11.30
기 동 전 류 [A]	2.83
코일 단면적 [mm <sup>2</sup> ]	1.0
상 당 저 항 [Ω]	0.495
인덕턴스 [mH]	0.87

## 6. 전력변환시스템 구성 및 제어

### 6.1 전력변환시스템 구성

그림 9에서는 기존의 연속전지를 대체할 목적으로 FES가 EMB(Electro Mechanical Battery)로써 동작할 수 있도록 구성된 주 전력회로와 제어를 위한 피드백을 나타내고 있다. 스위칭 소자는 1200[V]/75[A]-IGBT 모듈을 사용하였다. 인버터 출력단에 220[V]의 교류전압을 얻기 위한 직류전압은 삼각파 비교방식을 사용할 경우 최소 280[V] 공간벡터변조기법의 경우 245[V]가 되어야 하지만 본 실험에서는 100[V]/10[A]의 출력 용량을 갖는 정전압 직류전원공급장치를 직류단에 연결하여 실험을 수행하여 제특성을 파악하였다. 직류전원은 가속시 MC1에 의해 직류커패시터와 연결되어 직류원으로부터 인버터와 모터를 통해 휠에 에너

지가 저장되며 MC2는 회생모드에서 부논리로 MC1과 연동하며 휠이 가지는 기계적인 운동에너지는 모터와 인버터를 통해 직류부하에 필요한 전기에너지로 제어되어 일정 전압으로 저항부하에 인가되게 된다.

부하로서는 직류측에 25[Ω]-500[W]의 저항 부하를 연결하였다. 추후 이 부하부분에 대해서는 직류부하로써 단상 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 있다.

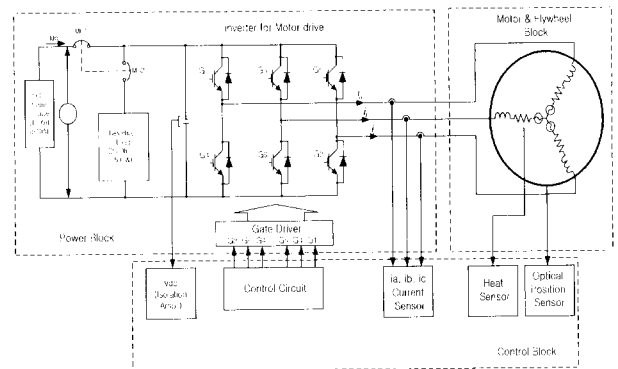


그림 9 실험에 사용한 전력변환회로  
Fig. 9 Power conversion circuit for experiment

### 6.2 전동발전기 제어

그림 10에서는 동기전동기의 a상에 대한 등가회로와 페이저도를 나타내고 있다.  $E_{gap,a}$ 는 전기자 전류에 쇄교자속  $\phi_{sa}$ 와 영구자석에 의한 자속  $\phi_{fa}$ 에 의해 발생된 공극자속이 a상 권선과 쇄교함으로써 발생하는 유기기전력을 의미한다. 그림 10(b)으로부터 계자 자속에 의한 a상 유기기전력  $e_{fa}$ 는 아래와 같이 주어진다.

$$e_{fa} = \omega N_s \phi_f \cos \omega t = \sqrt{2} E_{fa} \cos \omega t [V] \quad (3)$$

3상 입력으로부터 기계적인 힘으로 변환되는 전력  $P_{em}$ 과 기계적 출력  $T_{em}$ 은 다음 식과 같이 주어진다.

$$P_{em} = 3 E_{fa} I_a \cos(\delta - 90^\circ) [W] \quad (4)$$

$$T_{em} = k_t \phi_f I_a \sin \delta [N] \quad (5)$$

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

따라서 일정 전류로부터 에너지 저장시 최대 효율을 얻기 위해서는 입력전류를 유기기전력  $E_{fa}$ 와 동상으로 제어하여야 한다. 본 연구에서는 회전자 위치를 검출함으로써 유기기전력의 위상기준값으로 하였다.

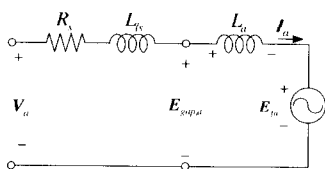
한편 회전 운동에 대한 기계적 운동 방정식은 다음과 같이 된다.

$$T_E = J \cdot \frac{d\omega_m}{dt} + B \cdot \omega_m \quad (6)$$

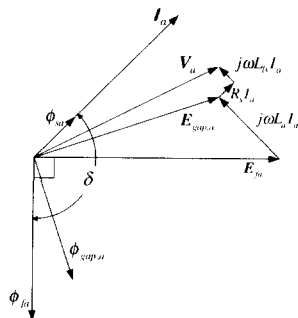
단,  $J$ : 회전체의 관성 모멘트 [ $ZKg \cdot m^2$ ]

$B$ : 마찰계수

$\omega_m$ : 회전각속도 [rad/sec]



(a)



(b)

그림 10 (a) 영구자석동기전동기의 a상 등가회로  
(b) 페이저도

Fig. 10 (a) Equivalent circuit for phase a  
(b) phaser diagram

### 6.3 회로 설계

초전도 플라이휠 에너지 저장시스템에 관한 전력변환은 영구자석 동기전동기의 고효율 초고속 드라이브를 기본으로 하고 있다. 휠의 회전축이 없으므로 회전 중심은 회전속도가 가속됨에 따라 자계중심에서 무게중심으로 변해가고 전기자 전류에 의한 토크 리플은 휠의 불안정을 초래하기 때문에 정현파로 제어되어야 한다. 또한 40,000[rpm]의 고속운전을 하기 위한 인버터 출력전압 기본주파수는 약 660[Hz]에 이르기 때문에 제어에 어려움이 있다. 따라서 본 논문에서는 위와 같은 운전조건을 만족시키고 고효율 운전을 실현하기 위한 방법으로 인버터 출력전류는 히스테리시스 기법을 사용하여 제어하였으며 그림 11에서 보는 바와

같은 정현파 출력전류의 기준값 발생회로를 구성하였다. 계자회로를 높은 잔류자속밀도를 갖는 영구자석을 사용할 경우 전기자 반작용은 무시할 수 있다. 따라서 각 상의 유기기전력은 회전자 위치정보로부터 구할 수 있게 되는데 위치정보에 사용된 광센서는 180도의 구형파 출력으로 되며 그림 11의 PLL(Phase Lock Loop)에 입력된다.

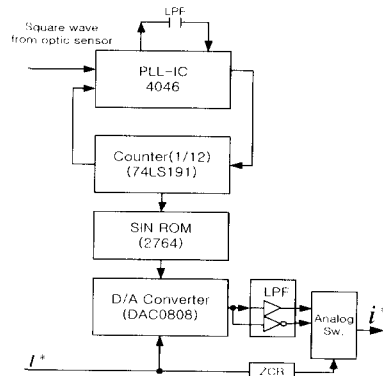


그림 11 정현파 전류 기준값 발생회로  
Fig. 11 Circuit diagram of sinusoidal current reference generation

PLL회로는 구형파 입력과 분주된 신호의 에러를 검출하기 위한 배타적 OR Gate, VCO(Voltage Coupled Oscillator), 에러값을 평활화 하여 VCO의 입력으로 사용하기 위한 LPF(Low Pass Filter), 12진 카운터로 구성된다. 분주된 신호는 ROM(Read Only Memory)에 기록된 정현파 데이터를 출력하기 위한 어드레스 입력으로 사용되며 ROM의 정현파 출력 데이터는 D/A Converter를 통해 일정정도의 리플을 갖는 아날로그 데이터로 변환되게 된다. 본 연구에서는 고가의 아날로그 승산소자를 사용하지 않고 D/A Converter에 DAC0808을 사용하여 아날로그 스위치와 결합하여 4상한의 승산이 가능하도록 구성하였다.

넓은 속도 범위에 걸쳐 PLL특성을 얻고 동시에 빠른 동기특성을 얻기 위해서 LPF의 설계는 매우 중요하게 된다. 설계된 회로의 동작범위는 최저 주파수 40[Hz] (2400[rpm])에서 720[Hz](43,200[rpm])로써 휠의 설계사양을 만족한다. 40[Hz]미만의 주파수 범위에서는 구형파 PWM을 사용하여 기동하도록 하였다.

### 7. 실험결과

그림 12는 초전도 플라이휠과 Anglo contact bearing을 사용한 FES의 자연감속특성과 이 특성으로

부터 구한 에너지 손실을 나타내고 있다. 초전도베어링의 경우 9000[rpm]에서 약60[W]의 손실이 나타났으며 볼 베어링의 경우 매우 빠른 감속특성을 보이고 있다.

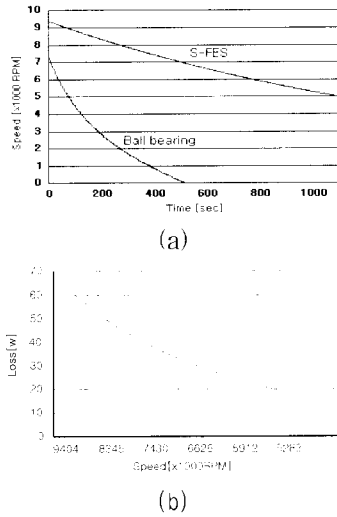


그림 12 (a) 자연감속특성  
(b) S-FES의 기계적 손실  
Fig. 12 (a) Characteristics of natural spin down  
(b) Mechanical losses of S-FES

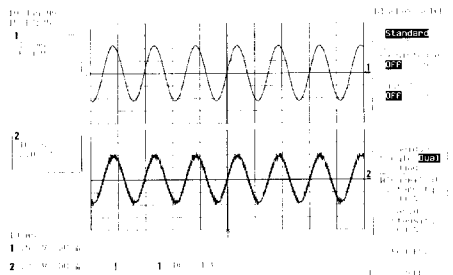


그림 13 전력저장 모드시 인버터 출력전류(4000[rpm])  
Fig. 13 Inverter output current in power saving mode

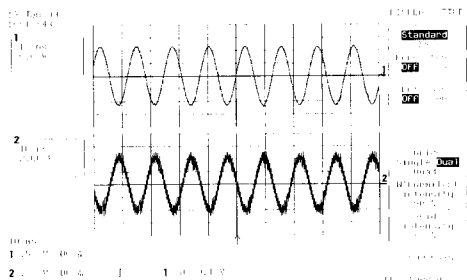


그림 14 전력회생모드시 인버터 출력전류(7000[rpm])  
Fig. 14 Inverter output current in power regeneration mode(7000[rpm])

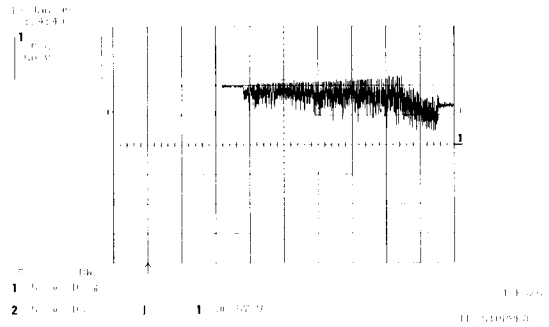


그림 15 400[W] 전력회생시 직류전압  
Fig. 15 DC output voltage in power regeneration mode(400[W])

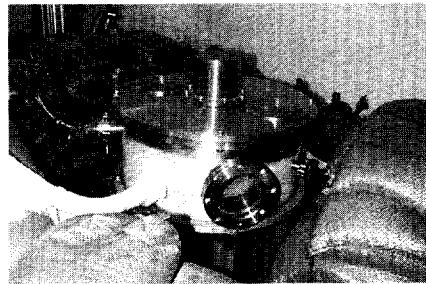


그림 16 S-FES 외관  
Fig. 16 Appearance of S-FES

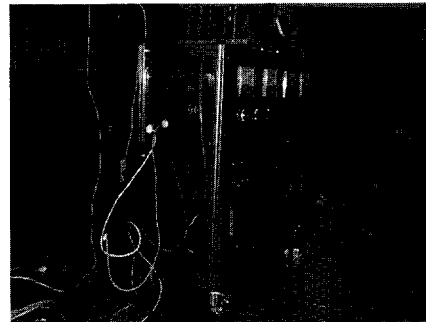


그림 17 전력변환기  
Fig. 17 Power converter

그림 13-14에서 상부파형은 유기기전력 위상과 동상의 정현파신호를 하부는 전류파형을 각각 나타내고 있다. 유기기전력 위상과 비교하여 전력저장모드와 회생모드에서 각각 동상과 180도 위상차를 갖는 정현파전류로 제어되고 있음을 알 수 있다. 그림 15에서는 25[Ohm] 저항부하에서 회생시 직류출력전압 100[V]을 나타내고 있다. 그림 16-17에 실험장치의 외형을 나타낸다.



## 8. 결 론

40,000[rpm], 15[Kg], 0.084[Kg·m<sup>2</sup>], 240[Wh]의 제원을 갖는 SUS 금속 플라이휠을 사용한 초전도 플라이휠 에너지 저장시스템에 관한 연구를 수행하였다. 진동/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. 불베어링을 사용한 시스템에서는 7,000[rpm]에서 100[V]의 일정 전압으로 약 25초 동안 400[W]의 전력을 회생하였다. 초전도 플라이휠 장치에서는 최고 10,000[rpm]까지 가속하였으며 매우 안정된 회전특성과 낮은 베어링마찰을 확인함으로써 플라이휠 에너지 저장장치로써 우수한 특성을 나타내고 있음을 입증하였다. 차후 정격전압의 전체 운전속도 범위에서 고조파 전류와 스위칭손실의 시스템 효율에 미치는 영향을 분석할 계획이다.

## 참 고 문 헌

- [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," *ISTEC 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," *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.
- [6] Fumihiko Ishikawa, Hiromasa Higasa, Kagawa, "Flywheel Storage Systems with Temperature Superconductivity (HTS) Bearings," *VDI BERICHT NR. 1187*, 1995.
- [7] R. S. Weissbach, G. G. Karady and R. G. Farmer, "Dynamic Voltage Compensation on Distribution Feeders using Flywheel Energy Storage," *IEEE Trans. on Power Delivery*, vol. 14, No. 2, April 1999.
- [8] Hans J. Bornemann, "Conceptual system design of a 5MWh/100 MW superconducting flywheel energy storage plant for power utility applications" *IEEE Transactions on Applied Superconductivity*, Vol. 7 No. 2 P. 1-3, 6/01/97.
- [9] Ted T1 Leung, "Concept of a modified flywheel for megajoule storage and pulse conditioning," *IEEE TRANSACTIONS ON MAGNETICS*, VOL. 27, NO. 1, January pp. 403-408, 1991.
- [10] Robert G. Abboud, "Flywheel Energy Storage using Superconducting Magnetic Bearings," *The 56th Annual American Power Conference Chicago, IL-April 27, 1994*.
- [11] Itaru Andoh, Akira Moriyama, Isao Takahashi, "Development of a High Efficiency Flywheel UPS using 3 Arms Inverter/Converter," *T. IEE Japan*, Vol. 116-D, No. 11, '96.

## 저 자 소 개



### 정한명(鄭煥明)

1967년 10월 9일생. 1993년 충북대 전기공학과 졸업. 1995년 동 대학원 전기공학과 졸업(공학석사). 현재 동 대학원 박사과정.



### 연제욱(延濟旭)

1972년 11월 20일생. 1998년 충북대 전기공학과 졸업. 현재 동 대학원 전기공학과 석사과정.



### 최재호(崔載昊)

1955년 9월 27일생. 1979년 서울대 전기공학과 졸업. 1981년 동 대학원 전기공학과 졸업(공학석사). 1985년 동 대학원 전기공학과 졸업(공학박사). 1981년~1983년 중경공업전문대학 전자과 전임강사. 1983년~현재 충북대학교 공과대학 전기전자공학부 교수. 1993년~1994년, 1997년~1998년 University of Toronto(Visiting Professor). 당 학회 편집이사.



### 고창섭(高彰燮)

1964년 2월 18일생. 1986년 서울대 전기공학과 졸업(학사). 1988년 동 대학원 전기공학과 졸업(공학석사). 1992년 동 대학원 전기공학과 졸업(공학박사). 1993년~1993년 미국 Florida Int'l university 전기 및 컴퓨터 공학과 객원연구원. 1994~1996년 삼성전기(주) 종합연구소 선임연구원. 1996~현재 충북대학교 전기전자공학부 조교수.