

# 초전도 부상 플라이휠 에너지 저장시스템의 구동을 위한 전동/발전기

論 文  
49B-6-7

## A Motor/Generator for Flywheel Energy Storage System Levitated by Bulk Superconductor

高 彰 燮\* · 延 濟 旭\*\* · 鄭 煥 明\*\*\* · 崔 載 昊<sup>§</sup> · 洪 啓 源<sup>§§</sup> · 李 浩 鎮<sup>§§</sup>  
C.S. Koh · J.U. Yeon · H.M. Jeoung · J.H. Choi · G.W. Hong · H.J. Lee

**Abstract** - The energy storage systems are being widely researched for the high quality of the electric power. The FES(flywheel energy storage system) is especially, on the center of the research because it does not make any pollution and its life is long. The FES converts the electrical energy into the mechanical kinetic energy of the flywheel and reconverts the mechanical energy into the electrical energy. In order to store as much energy as possible, the flywheel is supposed to be rotated with very high speed. The motor/generator of the FES should be high efficient at high speed, and generate constant torque with respect to the rotation. In this paper, a motor/generator employing a Halbach array of permanent magnets is designed and constructed to meet the requirements, and its characteristics are examined. The magnetic field is analysed by using the magnetic surface charge method. The armature winding is designed for the harmonic components to be minimized by using the FFT. The sinusoidal currents for the motor driving are generated by the hysteresis current controller. A sample superconducting flywheel energy storage system is constructed with a duralumin flywheel which has a maximum rotating speed of 40,000[rpm] and a stored energy of 240[Wh] and its validity is examined through the experiment.

**Key Words** : Energy storage system, Halbach array, Flywheel, Magnetic Surface Charge Method, Hysteresis current control

### 1. 서 론

최근의 에너지 사용은 일정시간대에 전력사용이 집중하는 현상을 보이고 있다. 이것은 전력계통에 있어서 순간정전이나 전원전압의 감소, 유도성 부하에 의한 무효 전력증가 등으로 이어져 전력환경에 불안정한 요소로 작용한다. 따라서 잉여전력을 활용하여 전력환경을 개선하기 위하여, 또한 순간적으로 대전력을 공급하기 위하여 에너지 저장장치에 대한 관심이 높아지고 있다. 현재 에너지 저장장치로서 많이 사용되고 있는 것은 연속전지를 들 수 있다. 연속전지는 전반적인 단가는 낮지만 무게가 무겁고 효율이 60%정도로 낮고 반복하여 사용할 때 수명이 짧아지는 등의 단점을 갖고 있다. 또한 환경적 측면에서 보면 재생에 필요한 단가가 높고 상용시 유해가스를 발생하여 환경 친화적이지 못하다. 최근에 이러한 단점을 극복한 에너지 저장장치로서 환경친화적이고 반영구적 수명의 장점을 가진, 플라이휠을 이용한 에너지 저장시스템에 대한 연구가 활발히 진행되고 있다. 플라이휠 에너지 저장장치는 흔히 기계전지(Electro-mechanical battery)

또는 플라이휠 전지(Flywheel battery)로 불리며, 잉여 전기 에너지를 이용하여 무거운 플라이휠을 고속으로 회전시켜 전기 에너지를 기계적인 운동에너지로 변환하여 저장하였다가 필요할 때 전기에너지로 다시 변환하여 출력하는 장치이다. 그 응용으로는, On-Line UPS로서 전원으로 부터 항상 여분의 전력을 휠의 기계적 운동에너지로 저장한 다음 전원의 정전이나 전압 새그(sag)발생 시 휠의 기계적 에너지를 전기에너지로 변환하여 부하에 안정된 전력을 공급하거나, 정류기 혹은 유도부하와 같이 고조파와 무효전력을 발생하는 부하의 입력측에 고조파 전류와 무효전류 성분을 계통에 주입하여 계통안정화에 도움을 주는 경우, 그리고 심야전력과 같은 잉여전력으로 야간에 휠을 가속함으로써 에너지를 저장하고 주간 부하 피크 시에 계통에 전력을 회생함으로써 부하율을 감소시켜 전력 예비율을 개선하는 곳 등에 사용된다.

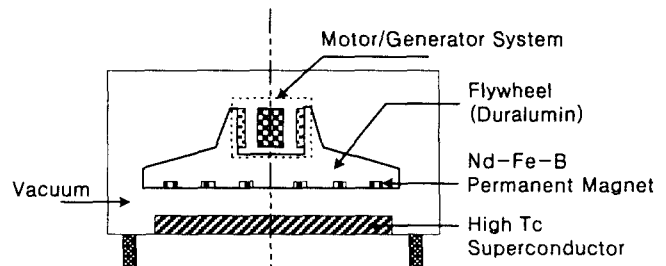


그림 1 플라이휠 에너지 저장시스템의 구성도  
Fig. 1 Schematic view of flywheel energy storage system

\* 正 會 員 : 忠 北 大 電 氣 電 子 工 學 部 助 教 授 · 工 博  
\*\* 準 會 員 : 忠 北 大 電 氣 電 子 工 學 部 碩 士 課 程  
\*\*\* 正 會 員 : 忠 北 大 電 氣 電 子 工 學 部 博 士 課 程  
§ 正 會 員 : 忠 北 大 電 氣 電 子 工 學 部 教 授 · 工 博  
§§ 正 會 員 : 韓 國 原 子 力 研 究 所 機 能 性 材 料  
接 受 日 字 : 2000 年 1 月 25 日  
最 終 完 了 : 2000 年 4 月 20 日

플라이휠 에너지 저장장치는 그림 1과 같이 고속회전이 가능한 플라이휠, 공기마찰에 의한 손실을 저감하기 위한 진공장치, 기계적 또는 자기적인 베어링, 플라이휠의 구동과 발전을 위한 전동/발전기 및 에너지 입출력 제어부로 구성되어 있다. 최근의 연구 동향은 위의 각 항목에 대한 연구가 활발히 진행 중이고 특히 기계적인 베어링을 이용한 플라이휠 에너지 저장장치는 상용화가 이루어지고 있는 실정이나, 이 경우에는 베어링 손으로 인하여 효율을 높이는데 한계가 있다 [1,2]. 따라서 최근에는 국내에서도 고온 초전도체와 영구자석을 사용하여 플라이휠을 부상시킴으로써 마찰 손실을 줄이기 위한 연구가 진행 중에 있다[3-6]. 그러나 플라이휠의 구동과 발전의 관점에서 보면 기계적인 베어링과 초전도 베어링 중 어떤 베어링을 사용하는 경우에도 플라이휠에 저장되는 회전 운동 에너지가 플라이휠의 회전관성모멘트(Inertia)와 회전각속도의 자승에 비례하기 때문에 초고속 회전은 반드시 필요하다. 이에 따라 초고속 회전 시 높은 효율을 유지할 수 있는 전동/발전기의 개발이 필요한 실정이다.

플라이휠 에너지 저장시스템의 구동을 위한 기존의 구동 모터로는, 견고하고 유지보수가 간단하다는 등의 장점 때문에 유도전동기가 널리 이용되어 왔으나, 수만 rpm급 이상으로 회전하기에는 그 자기적인 구성이 너무 복잡하여 기계 역학적으로 부적합한 것으로 알려져 있다[3,7,8]. 더욱이 초고속 운전을 위하여 높은 주파수의 전원을 인가하면 철손과 동손이 대폭 증가되어 전체 시스템의 효율이 나빠지고 시스템의 냉각 문제가 대두되는 등의 단점이 있다[7]. 또한 Nd-Fe-B 영구자석을 이용한 영구자석 BLDC 모터가 구동시스템으로 연구되었으나, 이 경우 역시 철심을 사용하기 때문에 고주파 전원에 의한 철손의 증가로 발열, 효율저하 등의 문제를 갖고 있어 부적합하다고 하겠다[2,9,10,11]. 특히, 플라이휠 에너지 저장시스템이 장시간 고속으로 운전되는 경우에는 구동 시스템의 효율이 전체 시스템의 효율을 좌우하게 되므로 특히 고속에서 높은 효율을 유지하는 구동 시스템의 개발은 필수적이다. 최근에 초고속 회전에 고주파 전원에 의한 철손의 증가를 근본적으로 해결하기 위하여 영구자석의 Halbach 배열을 응용한 모터에 관한 연구가 진행되고 있다[1,2,3,7,8]. 영구자석의 Halbach 배열은 1979년 Klaus Halbach에 의해 제안된 구조로서 여러 개의 영구자석 편을 적절히 조합함으로써 철심 등의 자성체를 사용하지 않고도 모터에 필요한 자계 분포를 발생시키는 시스템으로, 1993년 미국의 Post가 기계전지의 구동시스템에 적용하여 초고속 전동/발전기의 계자에 매우 효과적임을 입증하였다[1,2]. 즉 영구자석의 Halbach 배열은 구조적으로 철심 등의 자성체를 사용하지 않고 잔류자속밀도가 높은 Nd-Fe-B자석만을 사용하여 계자 내부에 비교적 높고 균일한 자속분포를 형성하기 때문에 이를 모터 설계에 응용하면 고속 회전에서 발생하는 히스테리시스 손 및 와류손을 줄일 수 있어 초고속 플라이휠 에너지 저장장치의 구동 모터에 적합하다. 그림 1은 본 논문에서 연구된 구동시스템을 사용하여 제작된 초전도부상 플라이휠 에너지 저장시스템의 구성도이다. 외함은 냉각과 진공상태를 유지하며, 시스템 아래 부분에 플라이휠 부상을 위한 초전도체가 위치한다. 플라이휠의 아랫부분에 부상용 Nd-Fe-B 영구자석이 위치하고 윗부분에 구동용 모터가 위치한다.

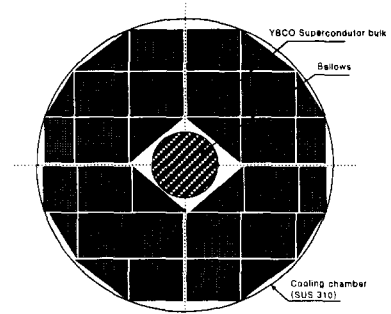


그림 2 YBCO 초전도체 벌크의 배열  
Fig. 2 YBCO superconductor bulk array

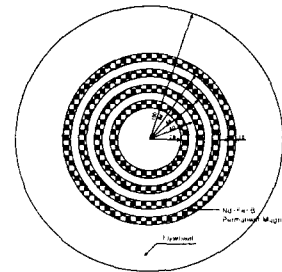


그림 3 부상용 영구자석 배열  
Fig. 3 Permanent magnet array for levitation

본 연구에서는 영구자석 Halbach 배열을 이용한 모터의 특성을 해석하기 위하여 표면차하법((Magnetic surface charge method)을 개발하여 자기회로를 해석하였고, 플라이휠 에너지 저장장치의 구동 모터 설계의 기준을 제시하였다. 또한 40,000[rpm], 65[Wh]급 초전도 플라이휠 에너지 저장시스템의 구동용 전동/발전기를 영구자석의 Halbach 배열을 이용하여 설계하였으며 이를 제작하여 실험함으로써 그 특성을 파악하였다.

## 2. 초전도 부상시스템

임계온도 이하로 냉각된 초전도체를 영구자석 위에 올려놓으면 고온 초전도체는 외부자장이 1차 자력한계보다 작을 경우는 Meissner 효과에 의해 부상하며 외부자장이 초전도체의 1차 자력한계와 2차 자력한계 사이에 있으면 자력이 초전도체 안으로 침투하여 부상하게 된다[5]. 이때 용융법으로 제조된 초전도체와 같이 임계 전류밀도가 높고 강력한 자력 속박성을 갖는 재료는 플럭스피닝(flux pinning)에 의해 초전도체 안에 외부자장을 포획한다. 이때 발생하는 부상력은 포획된 자장의 크기와 외부자장, 즉 영구자석에서 발생된 자계의 세기에 비례하며, 반발력과 인력의 두 성분을 동시에 가지게 된다. 그림 2는 본 논문에서 사용된 초전도체를 냉각시키기 위한 냉각용기 내부에 배열된 YBCO 초전도체의 배열이다. YBCO 초전도 벌크는 SEED GROWTH방법으로 제조되었으며 총 32개의 초전도 벌크들을 이용하여 제작하였다. 그림 3은 플라이휠의 밑면에 설치된 부상용 Nd-Fe-B 영구자석의 분포를 나타낸 것이다. 링 형태의 자석들을 반경 방향으로 서로 N-S-N-S가 되도록 배치하였으며 안쪽 2개의 링 자석은 각각

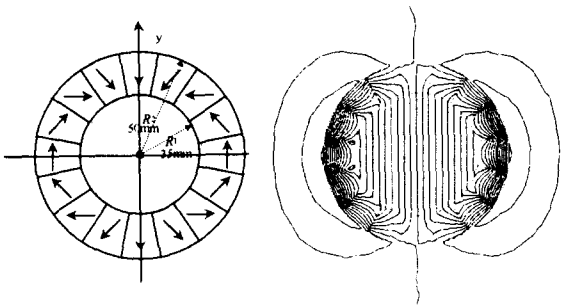
1 몸체로 제작하였으나 바깥쪽 2개의 링 자석은 여러 조각을 조립하여 제작되었다[6]. 그림 2와 3의 고온 초전도체와 부상용 영구자석을 그림 1에서와 같이 일정한 거리를 유지하면서 초전도체를 임계온도 이하로 냉각하면(Field cooling), 플럭스 피닝에 의하여 초전도체와 영구자석은 일정한 거리를 유지하며 부상력이 발생되고 또한 횡방향의 어긋남에 대응하는 회복력이 발생하여 부상시스템과 횡방향 베어링의 역할을 동시에 수행하게 된다[5].

### 3. 영구자석 Halbach 배열 계자의 구성과 특성 해석

영구자석 Halbach 배열의 기본 개념은 실린더 링형의 영구자석을 자화방향이 연속적으로 회전하도록 착자하면 영구자석의 외부에는 누설자계가 전혀 발생하지 않고 영구자석의 내부에는 균등한 2극의 자계가 발생한다는 것이다[12]. 그러나, 실제로는 그림 4 (a)에서와 같이 일정한 자화방향을 갖는 여러 개의 영구자석 편을 조립하여 근사적으로 자화방향이 연속적으로 회전하도록 한다. 이때 영구자석의 내경에 비하여 축방향 길이가 충분히 길면 그림 4 (b)와 같이 누설자속이 비교적 작고 영구자석의 내부에 균등한 2극 자계가 형성된다. 원통 내부의 균등한 자속밀도( $B_0$ )는 다음과 같이 표현되며[1,12],

$$B_0 = B_r \ln \left( \frac{r_2}{r_1} \right) \cdot \left\{ \frac{\sin(2\pi/M)}{2\pi/M} \right\} \quad (1)$$

여기서  $B_r$ 는 영구자석의 잔류자속밀도,  $r_1$ 과  $r_2$ 는 각각 영구자석의 내경과 외경이고  $M$ 은 영구자석 편 수이다. 따라서 영구자석이 두께와 영구자석의 편수를 조절하여 원통 내부의 자속밀도를 조절할 수 있게 된다.



(a) 영구자석의 Halbach 배열 (b) 2차원 유한요소해석  
(a) Permanent magnet Halbach array (b) 2-dimensional finite element analysis

그림 4 영구자석 Halbach 배열에 의한 자계분포:  
Fig. 4 Magnetic field distribution by permanent magnet Halbach array:

영구자석 Halbach 배열을 실제 모터의 계자시스템으로 사용하면 영구자석의 직경에 비하여 축방향 길이가 충분히 길지 않기 때문에 그림 4 (b)와 같은 균등한 자계가 얻어지지 않으며 계자시스템을 정량적으로 해석하여 모터 설계에 응용하기 위해서는 3차원적인 요소를 고려한 수치해석법을 이용하여야 한다.

### 3-1. 영구자석 Halbach 배열의 자계 해석

원통형 영구자석 Halbach 배열은 각각의 영구자석 편이 일정한 방향으로 균등하게 자화되어 있고 영구자석의 주위에 다른 자성체가 존재하지 않기 때문에 표면자하법(Magnetic surface charge method)을 이용하여 발생하는 자계의 분포를 쉽게 계산할 수 있다.

원천점( $\vec{r}'$ )에 위치한 자기모멘트  $\vec{M}(\vec{r}')$ 에 의하여 관측점( $\vec{r}$ )에 발생하는 자기벡터포텐셜은 다음과 같이 표현되고

$$\vec{A}(\vec{r}) = \frac{\mu_0}{4\pi} \int_{vol} \frac{\vec{M}(\vec{r}') \times (\vec{r} - \vec{r}')}{|\vec{r} - \vec{r}'|^3} dv' \quad (2)$$

자속밀도는 자기벡터포텐셜과의 관계로부터 다음과 같이 표현된다[13].

$$\vec{B}(\vec{r}) = \nabla \times \vec{A}(\vec{r}) = \frac{\mu_0}{4\pi} \int_{vol} \nabla \times \left\{ \vec{M}(\vec{r}') \times \frac{(\vec{r} - \vec{r}')}{|\vec{r} - \vec{r}'|^3} \right\} dv' \quad (3)$$

식 (3)의 피적분항에 벡터항등식을 이용하면 자속밀도는 다음과 같이 표현되고

$$\vec{B}(\vec{r}) = \mu_0 \vec{M}(\vec{r}) - \mu_0 \nabla \cdot \frac{1}{4\pi} \int_{vol} \vec{M}(\vec{r}') \cdot \frac{(\vec{r} - \vec{r}')}{|\vec{r} - \vec{r}'|^3} dv' \quad (4)$$

다음의 벡터항등식을 이용하면

$$\vec{M}(\vec{r}') \cdot \frac{(\vec{r} - \vec{r}')}{|\vec{r} - \vec{r}'|^3} = \nabla' \cdot \frac{\vec{M}}{|\vec{r} - \vec{r}'|} - \frac{1}{|\vec{r} - \vec{r}'|} \nabla' \cdot \vec{M} \quad (5)$$

식 (3)의 자속밀도는 다음과 같이 표현된다.

$$\vec{B}(\vec{r}) = \frac{\mu_0}{4\pi} \int_{vol} \rho_M \frac{(\vec{r} - \vec{r}')}{|\vec{r} - \vec{r}'|^3} dv' + \frac{\mu_0}{4\pi} \int_S \sigma_M \frac{(\vec{r} - \vec{r}')}{|\vec{r} - \vec{r}'|^3} dS' + \mu_0 \vec{M}(\vec{r}) \quad (6)$$

여기서,  $\rho_M$ 과  $\sigma_M$ 은 각각  $-\nabla' \cdot \vec{M}(\vec{r}')$ 과  $\vec{M}(\vec{r}') \cdot \vec{n}(\vec{r}')$ 으로 정의되며 체적자하(Magnetic volume charge)와 표면자하(Magnetic surface charge)이다. 그러나, 본 논문에서 다루고 있는 영구자석과 같이 균등하게 자화된 경우에는 각각의 영구자석 편 내부에서 자화벡터  $\vec{M}$ 이 일정하고 따라서 식 (6)의 우변 첫째 항은 영이 되어, 영구자석의 외부 영역에서의 자속밀도는 영구자석의 표면에 유기되는 표면자하만에 의하여 계산되어진다. 따라서 영구자석 외부에서의 자속밀도는 각 영구자석 편의 표면을  $M_s$ 개의 삼각형 요소로 분할하면 다음식으로 구하여 지며

$$\vec{B}(\vec{r}) = \frac{\mu_0}{4\pi} \sum_{k=1}^N \sum_{i=1}^M \int_{\Delta_i} \vec{M}_k(\vec{r}') \cdot \vec{n}_i(\vec{r}') \frac{(\vec{r} - \vec{r}')}{|\vec{r} - \vec{r}'|^3} ds \quad (7)$$

여기서,  $N$ 은 영구자석 편수이고  $\vec{M}_k$ 는  $k$ 번째 영구자석 편의 자화벡터,  $\vec{n}_i$ 는  $i$ 번 삼각형 요소의 외향 단위 법선 벡터이다.

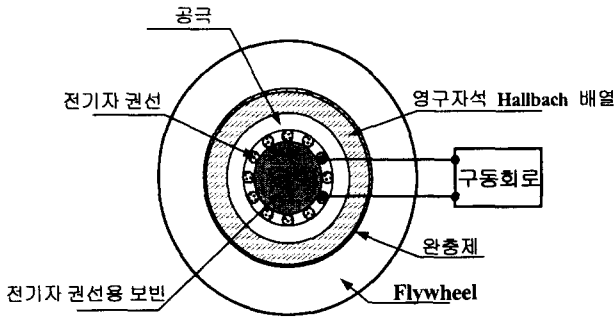


그림 5 전동/발전기의 구성도  
Fig. 5 Configuration of Motor/Generator

4. 전동/발전기의 설계

영구자석의 Halbach 배열을 이용한 구동 전동/발전기의 동작원리는 근본적으로 영구자석 BLDC모타와 동일하며 그 구성도를 그림 3에 나타내었다. 플라이휠 에너지 저장장치의 구동 모타는 그 특성상 고속회전을 필요로 하므로 고속회전에서 모타의 진동을 최소화 하기 위하여 토크의 맥동이 작도록 설계해야 한다. 이런 관점에서 정현파 구동 모타(Sinewave motor)가 적합하다고 할 수 있다. 특히 자석계자에 의하여 영구자석 내부에 형성된 자계의 반경방향 성분이 자석계자의 축방향 길이가 충분히 긴 경우에는 원주방향으로는 정현적인 분포를 갖기 때문에 본 논문에서는 정현파 모타로 설계하였다.

4.1 기동 토크, 정격 토크 및 무부하 손실 토크 산정

모타의 기동토크( $T_s$ )는 모타의 부하인 플라이휠이 정지상태에서 최대속도( $N_{max}[rpm]$ )까지  $t_s[sec]$  시간 동안 일정하게 가속된다고 가정하면, 부하의 관성 모멘트를 고려하고 마찰을 무시하면 다음식과 같이 계산되며

$$T_s = J \frac{d\omega}{dt} \cong J \times \frac{2\pi N_{max}/60}{t_s \cdot 60} [N \cdot m] \quad (8)$$

여기서,  $J$  는 플라이휠의 관성모멘트이고  $\omega$  는 각속도이다. 모타의 정격 토크( $T_r$ )는 모타가 발전기로 운전되는 동안 운전속도와 운전시간을 고려하여 설정되며, 운전속도의 범위를  $N_1[rpm]$ 에서  $N_2[rpm]$ 이라 하고 운전시간을  $t_o$ 라고 하면 다음식으로 계산된다.

$$T_r = J \frac{d\omega}{dt} \cong J \times \frac{2\pi(N_1 - N_2)/60}{t_o \cdot 60} [N \cdot m] \quad (9)$$

모타의 무부하 손실토크( $T_o$ )는 각종 손실(구동전류에 의한 영구자석의 와전류손실, 초전도체의 교류손실 및 풍손 등)을 고려하여 정격토크의 5%로 산정하였다.

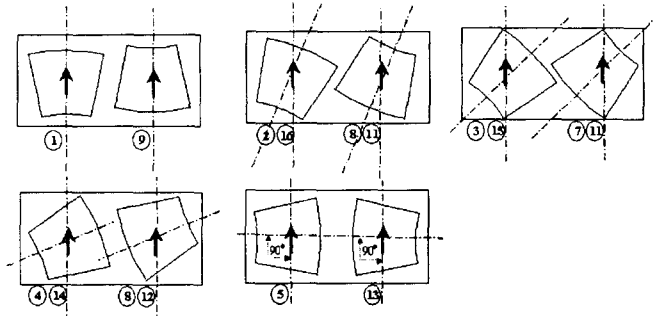


그림 6 Halbach 계자를 구성하기 위한 영구자석 편  
Fig. 6 Permanent magnet segments for Halbach array

4.2 영구자석 계자 설계

영구자석의 잔류자속밀도가 정해지면 계자의 직경과 길이 등은 정격토크로부터 장하비를 도입하여 결정하게 된다. 그러나 일반적으로 Nd-Fe-B 소결 영구자석은 그 크기를 임의로 선정할 경우 그 단가가 매우 비싸지기 때문에 기성품 중에서 쉽게 입수할 수 있는 크기의 영구자석 중에서 선택하였다. 본 논문에서는  $50.8 \times 50.8 \times 25.4[mm]$ 인 이방성 소결 Nd-Fe-B 영구자석을 그림 6과 같이 가공하여 16개의 영구자석 편을 제작하고 이를 조립하여 그림 4-a)와 같이 내경  $35[mm]$ , 두께  $15[mm]$ 인 영구자석 계자를 구성하였다.

4.3 전기자 설계

정현파 구동 모타에서 전기자 권선은 정현적으로 분포하여야 한다. 그러나 실제의 전기자 권선은 슬롯을 가진 보빈에 분포권으로 위치하기 때문에 이상적인 정현파 분포가 불가능하다. 따라서 적당한 슬롯 수와 슬롯 피치를 결정하기 위해서는 여러 가지의 슬롯 수에 대하여 슬롯 피치를 변화시켜가면서 고조파분석을 통하여 정현파 분포에 가깝도록 결정해야 한다. 본 논문에서는 영구자석 Halbach 배열 계자가 2극을 형성하고 정현파 3상 구동을 하므로 슬롯 수는 18, 24 및 30 슬롯을 고려하였다. 각 슬롯 수에 대하여 정현적 권선분포가 이루어지도록 단절계수( $k_d$ )를 조정할 결과 단절계수는 8/9, 5/6, 그리고 15/18으로 나타났다. 따라서 각 슬롯에 위치하는 권선수를 FFT(fast fourier transform)를 이용하여 고조파 분석을 하면 슬롯 수에 따른 전기자 권선의 정현적 분포 정도를 알 수 있다. 그림 7에 각각의 경우에 대한 고조파 분석의 결과를 나타내었다. 각 슬롯에 따른 고조파 분석에서 기본파의 크기는 18 슬롯이 가장 크지만 기본파에 대한 전체 고조파의 비율을 나타내는 왜율(distortion factor)은 18슬롯의 경우는 48.09, 24슬롯의 경우는 45.36, 그리고 36슬롯의 경우는 45.05로서 슬롯 수 36이, 슬롯 피치 15/18의 경우가 가장 좋았다. 그러나, 36슬롯의 경우에는 슬롯과 슬롯 사이의 간격을 충분히 확보할 수 없기 때문에 본 논문에서는 24슬롯으로 전기자를 구성하였다.

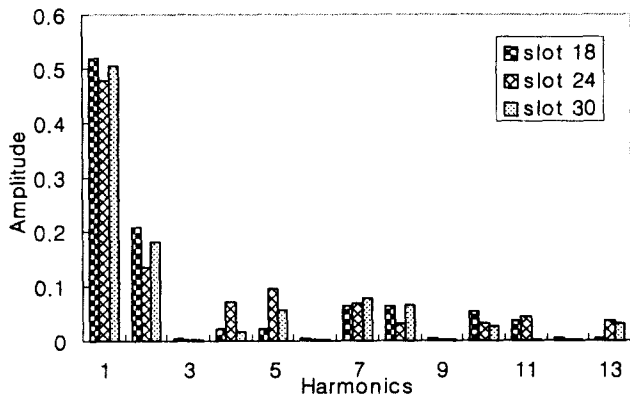


그림 7 각 슬롯 수에 따른 고조파 분석  
Fig. 7 Harmonics analysis for various number of slots

4.4 토크상수 및 유기기전력 상수 계산

영구자석 계자 내에 위치한 전기자 권선에 발생하는 토크는 영구자석 계자 내의 자속밀도가 일정하지 않기 때문에 수치계산을 통하여 다음식으로 계산되며,

$$\vec{T} = \sum_{a=1}^3 \sum_{i=1}^{W_a} \int_0^L (\vec{I}_a \times \vec{B}) \times \vec{r}_{ai} dl \quad (10)$$

$$= \left(\frac{3}{2}\right) \sqrt{2} k_w w \Phi_g \cdot I \quad (11)$$

여기서  $a$ 는 상을 나타내고,  $W_a$ 는  $a$ 상을 구성하는 전체 도체수,  $\vec{I}_a$ 는 방향을 고려한  $a$ 상의 인가전류이고  $L$ 은 코일의 길이,  $\vec{r}_{ai}$ 은  $a$ 상  $i$ 번째 도선의 반경 벡터,  $w$ 는 도선권회수 그리고  $\Phi_g$ 는 전기자 쇄교자속량이다. 식 (10)은 가우스 수치적분공식을 이용하여 계산된다. 토크상수( $K_T$ )는 식 (11)에서 회전자의 위치에 해당되는 각상의 전류를 인가함으로써 계산된다. 한편 유기기전력 상수( $K_E$ )는 유기기전력 상수와 토크상수와의 관계식으로부터 결정된다[14].

4.5 전기자 직렬권 회수 계산

플라이휠이 회전함에 따라 전기자 권선에 발생하는 유기기전력은 다음과 같이 표현할 수 있으며,

$$E_0 = K_E \cdot N = \sqrt{2} \pi f k_w W \Phi_g \times 10^{-8} [V] \quad (12)$$

여기서,  $E_0$ 는 유기기전력,  $W$ 는 상당권회수, 그리고  $f$ 는 회전주파수이다. 상당 전기자 직렬권회수( $W$ )는 식 (11)에서 초기 상당 도체수( $W=6$ )를 입력하여 계산된 토크상수( $K_T$ ) 값으로부터 식 (11)을 이용하여 쇄교 자속량을 계산한 후 이 값을 식 (12)에 대입하여 플라이휠의 최대 회전속도에서 유기기전력이 인가전압과 일치하도록 전기자 직렬권회수  $k_w w$ 를 계산한다. 따라서 전기자 직렬권 회수  $w$ 는 다음식을 이용하여 재 계산된다.

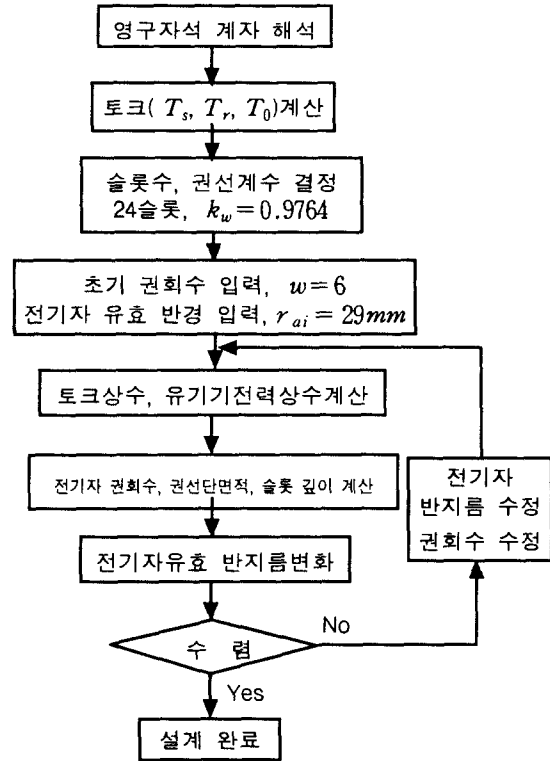


그림 8 설계 플로우차트  
Fig. 8 Flowchart of design procedure

$$w = (k_w w) / k_w \quad (13)$$

따라서 (10)와 (11)로부터 계산된 자속량을 바탕으로 식 (12)를 이용하여 전기자 직렬권회수( $W$ )가 수렴할 때까지 위의 과정을 반복한다.

5.6 도선 굵기

본 논문에서는 제어회로에서 모터에 인가되는 전류의 크기를 제어하기 때문에 정격 전류를 이용하여 전기자 도선의 단면적을 계산하였다. 따라서 동선 전류밀도  $\Delta a [mm^2]$ 를 이용하여 권선의 단면적은 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$A_c = \frac{T_s / K_t}{\Delta a} [mm^2] \quad (14)$$

본 논문에서 제작된 전기자 보빈(bobbin)의 경우 합성수지로 제작되어 열전도율이 매우 작기 때문에  $\Delta a = 4 [A/mm^2]$ 로 하였다. 전동/발전기의 전체적인 설계과정을 그림 8에 나타내었다.

5. 제작 및 실험

플라이휠 에너지 저장시스템의 구동용 영구자석 Halbach 배열 모터의 설계사양을 표 1에 나타내었다.

표 1 설계사양

Table 1 Design parameters

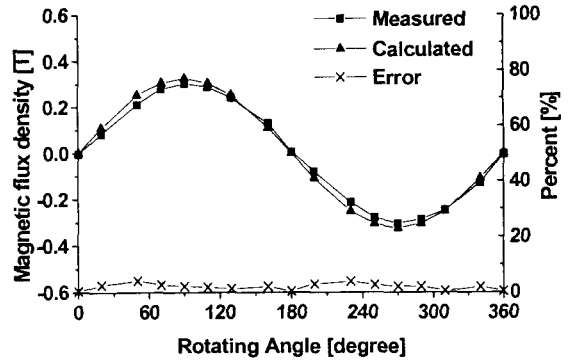
항 목	설계사양	항 목	설계사양
최대속도	40,000[rpm]	관성모멘트	0.099
운전속도	30,000-15,000	권선상수	3상
용 량	65[Wh]	기동시간	5[min]
인가전압	220[V]	감속시간	5[min]

본 논문에서 제작된 플라이휠의 재질은 알루미늄 합금 7075로 허용응력 480[MPa], 탄성계수 73[GPa], 밀도 2800[kg/m<sup>3</sup>], 반지름 15[cm], 무게 15[kg], 그리고 높이 6[cm]이며 관성모멘트( $J$ )는 0.099[Kg·m<sup>2</sup>]이다. 제작된 플라이휠의 형상과 재질에 대하여 허용 최고회전속도는 40,000[rpm]이다. 인가전압은 220[V]이며 기동 후 5분 이내에 최대 회전속도까지 도달하며 최저 운전속도는 15,000[rpm]으로 하였다.

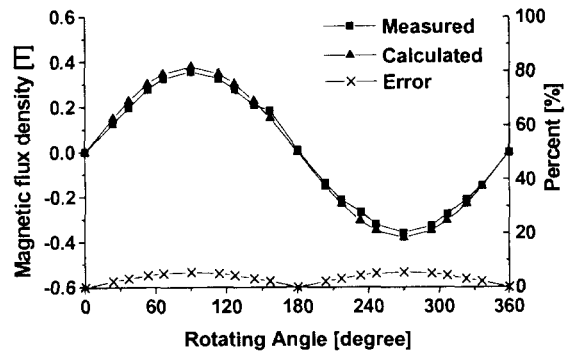
영구자석 Halbach 계자 내부의 자속밀도는 표면자하법을 사용하여 해석하였다. 잔류 자속밀도 1.2[T], 내경 70[mm], 외경 100[mm], 높이 50.8[mm]인 16개의 영구자석 편의 각각의 착자방향을 입력하여 내부에서의 자속밀도 값을 계산하였다. 실제 제작된 계자내부의 자속밀도 측정값과 계산된 결과를 그림 9에 비교하여 나타내었다. 자속밀도는 반경방향 성분을 측정하였으며  $r=15$ [mm],  $z=24.5$ [mm]와  $r=25$ [mm],  $z=24.5$ [mm] 두 위치에서 측정하였다. 표면자하법에 의한 계산결과와 측정값 모두 자계의 분포가 매우 정현적인 것을 알 수 있다. 따라서 플라이휠이 회전함에 전기자 권선에 발생하는 유기기전력 또한 정현적인 형태를 취할 것을 예상할 수 있다. 또한 계산된 영구자석 Halbach 계자 내부의 평균자속밀도는 0.3489[T]로서 K. Halbach에 의해 제시된 해석적 방법과 2차원 유한요소법에 의해 계산된 값(약 0.42[T])보다 다소 낮게 나타났지만 비교적 높은 자속밀도가 얻어짐을 알 수 있었다. 또한 그림에서 보듯이 계산치와 측정결과 사이에는 약 5% 정도의 오차가 존재하는데 이것은 각각의 영구자석 편의 착자의 편차, 불균일한 잔류자속밀도, 그리고 영구자석 편의 라운딩 등에서 발생한 것으로 추정된다.

계산된 자계분포로부터 식(10)을 이용하여 이미 설계된 전기자 슬롯 수, 권선계수, 그리고 전기자 직렬권회수에 대하여 전기자의 회전에 따른 토크의 분포를 계산하였고 그 결과를 그림 10에 나타내었다. 그림에서 보듯이 영구자석의 회전에 대하여 일정한 크기의 토크가 얻어짐을 알 수 있다.

설계되어진 영구자석 Halbach 배열 모터의 설계결과를 표 2에 나타내었다. 상단권회수는 96턴으로 슬롯 당 12턴이 권선되며 이때 유기기전력상수는 0.0057[V/rpm]이고 토크상수는 1.7034[kgcm/A]이다.



(a) 측정위치가  $r=15$  mm,  $z=24.5$ mm인 경우  
(a) along  $r=15$  mm,  $z=24.5$ mm



(b) 측정위치가  $r=25$  mm,  $z=24.5$ mm 인 경우  
(b) along  $r=25$  mm,  $z=24.5$ mm.

그림 9 자속밀도 분포의 비교

Fig. 9 Comparison of the field distribution

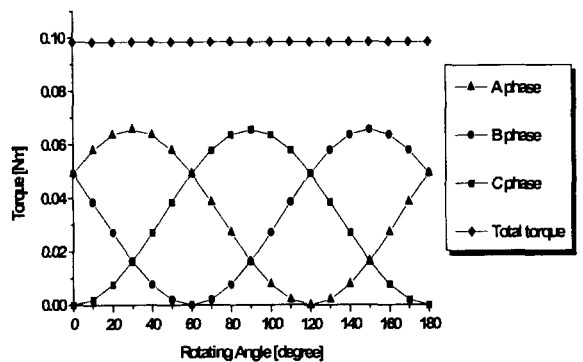


그림 10 토크 분포

Fig. 10 Torque distribution

표 2 영구자석 Halbach 배열 모터 설계 결과  
 Table 2 Design results of the permanent magnet Halbach array motor

항 목	설계 사양	항 목	설계 사양
기동 토크 [kgcm]	14.1	상당권 회수 [turn]	96
정격 토크 [kgcm]	5.287	토크 상수 [kgcm/A]	1.7034
계자 외경 [cm]	10	유기기전력상수 [V/rpm]	0.0057
계자 내경 [cm]	7	구속 전류 [A]	11.30
전기자 지름 [cm]	5.8	기동 전류 [A]	2.83
극당유효 자속량 [Mx]	88600	코일 단면적 [mm <sup>2</sup> ]	1.0
평균자속밀도 [T]	0.3489	상당 저항 [ $\Omega$ ]	0.495
인덕턴스 [mH]	0.87		

그림 11은 16개의 영구자석 편으로 구성된 Halbach 배열 계자가 플라이휠의 내부에 장착된 모습을 나타낸다. 플라이휠은 반지름 15cm, 무게 15kg, 높이 6cm로 제작되었으며, 가운데 부분에 Halbach 배열 계자가 위치하고 베이클라이트를 이용하여 영구자석과 플라이휠의 완충작용을 하게 하였다. 그림 12는 베이클라이트를 사용하여 제작된 전기자 보빈을 나타내고 있다. 플라이휠의 구동시 발생할 수 있는 진동을 고려하여 계자와 전기자 보빈 사이의 공극을 6mm로 하여 보빈의 외경은 58[mm], 높이는 계자의 높이 50.8[mm]를 고려하여 51[mm]로 제작하였다.

그림 13은 정현파 구동을 위한 구동회로를 나타내고 있다. 영구자석 Halbach 배열 계자에서 발생한 자계의 분포가 정현파 형태이므로 구동회로에 의해 권선에 인가되는 전류도 정현파 형태가 되도록 하여 토크의 맥동을 감소시켰다. 플라이휠이 회전함에 따라 발생하는 회전주파수를 PLL회로를 이용하여 롬(ROM)에 저장된 정현파형과 동기시켜 전류 기준을 만들고 각 상으로부터 검출된 순시치 전류를 이용하여 히스테리시스 전류제어를 하였다[15].

그림 14는 히스테리시스 전류제어에 의해 모터에 인가되는 전류의 파형을 나타낸 것이다. (a)의 파형은 전기자 권선의 역기전력 파형으로 히스테리시스 제어의 기준이 되며 (b)는 모터에 인가되는 인가전류이다. 역기전력과 인가전류가 동상이며 인가전류 파형이 정현적임을 알 수 있다.

그림 15는 플라이휠이 회전에 따라 발생하는 유기기전력을 나타낸 것이다. a상 단자와 중성점 단자사이의 상전압을 측정함으로써 정현파 분포임을 알 수 있다. 플라이휠의 회전 속도에 따른 유기기전력의 실효값을 그림 16에 나타내었다. 그림에서 (a)는 표면자하법에 의해 권회수를 상당 점유율 8의 배수가 되도록 조정할 경우의 유기기전력이고, (b)는 슬롯이 없는 전기자 보빈에 전기자 도선이 이상적인 정현파 형태를 취했을 경우의 유기기전력이며, (c)는 실제 제작된 플라이휠 에너지 저장장치에서 플라이휠의 회전에 따라 발생하는 유기기전력이다.

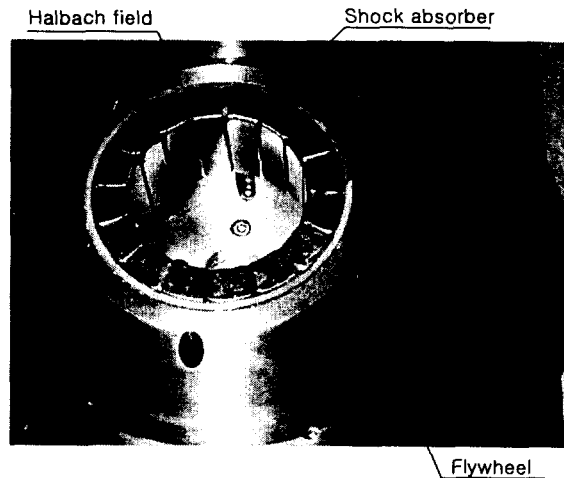


그림 11 영구자석 계자가 장착된 플라이휠  
 Fig. 11 Flywheel with permanent magnet



그림 12 전기자 권선  
 Fig. 12 Armature winding

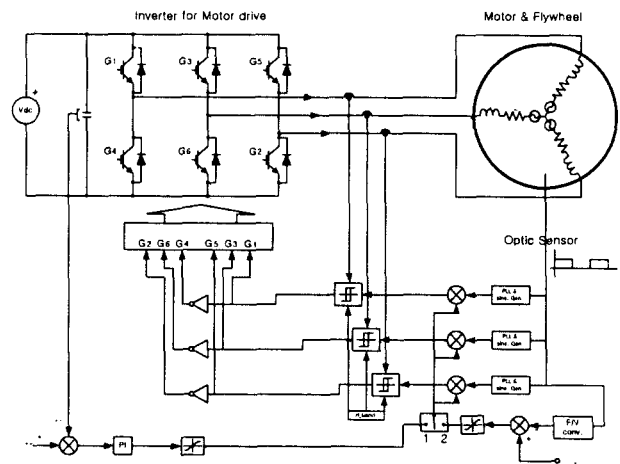


그림 13 정현파 전류 제어회로도  
 Fig. 13 Sinusoidal current controller

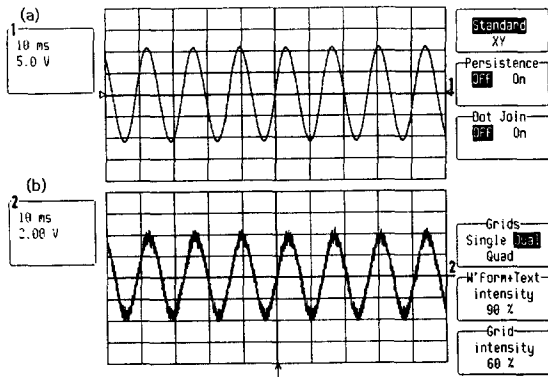


그림 14 인가 전류 파형:  
 (a) 역기전력 파형; (b) 인가전류파형  
 Fig. 14 Waveform of the applied current:  
 (a) Back EMF; (b) Applied current

그림에서 보듯이 계산치와 측정결과 사이에는 약간의 차이가 존재하며 이는 그림 9에서 나타난 바와 같이 계산된 자속 밀도와 측정된 자속밀도의 차이에 기인하는 것으로 생각된다.

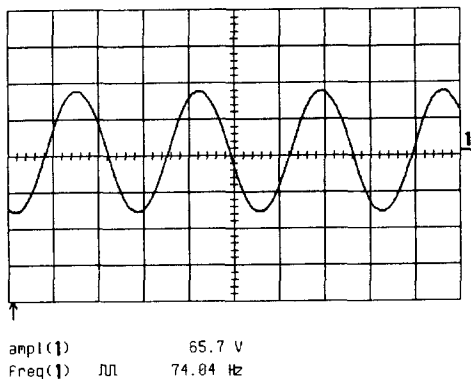


그림 15 유기기전력 파형  
 Fig. 15 Waveform of measured back EMF

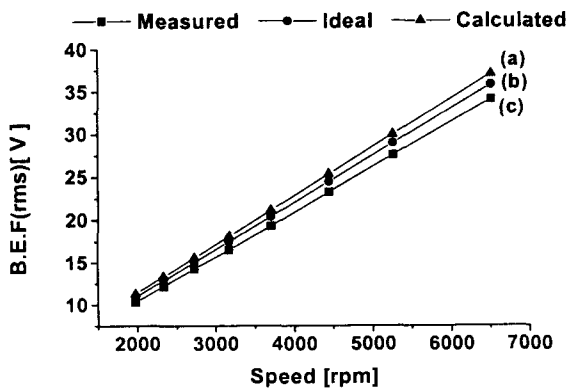


그림 16 회전속도에 따른 유기기전력의 변화  
 Fig. 16 Variation of back EMF v.s. rotating speed

그림 17은 약 10,000rpm의 회전속도에서 입력단자와 출력단자를 개방한 상태에서 플라이휠 에너지 저장장치의 자연감속 특성을 측정된 것으로 약 11분의 자연감속 후 회전속도가 68% 정도로 감소함을 알 수 있다. 이때 저장 에너지의 감소는 모두 플라이휠 자체에서 발생한 것으로, 실험이 진공용기 내에서 이루어진 점을 감안하면 풍손은 미미할 것으로 간주되고 대부분의 손실은 초전도체의 교류손실에 기인하는 것으로 생각된다. 이것은 부상용 영구자석에서 발생한 자계가 초전도체가 놓인 위치에서 일정하지 않기 때문에 플라이휠이 회전함에 따라 초전도체 내에서 자계가 변화하여 생긴 것으로 추정된다.

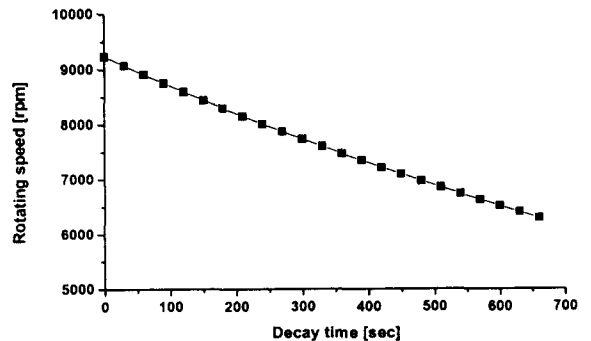


그림 17 플라이휠의 자연감속 특성  
 Fig. 17 Decay curve of the flywheel

## 6. 결 론

본 논문에서는 초전도체로 부상되는 플라이휠 에너지 저장 장치의 구동을 위하여 외전형 영구자석 Halbach 배열 모터를 설계, 제작하여 그 특성을 검토하였다. 플라이휠이 고속회전 시 발생하는 철손을 없애기 위하여 자성체를 사용하지 않는 영구자석 계자를 구성하였고 또한 전기자에도 비자성체인 합성수지를 이용하여 전기자 보빈(bobbin)을 구성하였다. 영구자석 계자의 특성은 표면자하법을 이용하여 해석하였고, 이로부터 모터를 설계, 제작하여 실험하였다. 모터는 진동을 줄이기 위하여 정현파 모터로 설계하였으며 정현파구동을 위하여 히스테리시스 전류제어를 이용하여 정현파 전류를 발생시켰다. 플라이휠의 회전속도에 따른 역기전력을 측정된 결과 계산에 의한 값보다 약간 작은 값을 나타내었는데 이것은 사용된 영구자석 편들의 불균일한 특성에 기인하는 것으로 향후 영구자석의 정교한 특성 평가에 관한 연구가 수행되어야 할 것으로 사료된다. 또한, 플라이휠의 자연감속 특성으로부터 약 10,000[rpm]에서 약 60[Wh]의 큰 손실이 발생하는 것을 알 수 있다. 이것은 초전도 부상시스템이 잘못 설계된 것으로 향후의 연구에서는 부상용 영구자석에서 발생하는 자계의 분포를 균등하게 하기 위한 부상시스템의 설계에 대한 연구가 요구된다. 특히 플라이휠 에너지 저장장치의 전체적인 운전 효율을 높이고 상용화를 위해서는 고효율 전동/발전기에 대한 연구뿐만 아니라 고효율의 부상시스템에 대한 연구도 수행되어야 할 것으로 사료된다.



## 참 고 문 헌

- [1] R. F. Post, T. K. Fowler, and S. F. Post, "A High-Efficiency Electromechanical Battery", Proc. of the IEEE, vol. 81, NO. 3, pp. 462-474, 1993
- [2] B. T. Merritt, et al., "Halbach Array Motor/Generators - A Novel Generalized Electric Machine", Lawrence Berkely Laboratory, Univ. of California, Berkeley, CA, 94720, Feb., 1995
- [3] 고창섭, 초전도 플라이휠 전력변환 시스템 연구 최종보고서, 한국 원자력 연구소, KAERI/CM-288/96, 1999. 3.
- [4] 연제욱, 정환명, 고창섭, 이호진, 홍계원, "플라이휠 에너지 저장장치의 구동을 위한 Halbach 배열 모터 설계", 충북대학교 산업과학기술연구소 논문집, 제 12권, 제 2호, 1998. 12.
- [5] 이호진, 이수훈, 고창섭, 김찬중, 홍계원, "초전도 플라이휠 시스템의 제작 및 설계", Proc. of the 8th Korean Conference on Materials and Applications of Superconductivity, Aug, 1998, pp. 268-270
- [6] 이호진, 김기백, 고창섭, 이수훈, 홍계원, "고온초전도체 베어링을 사용하는 에너지 저장용 플라이휠 장치의 제작 및 성능 평가", Proc. of the Korean Superconductivity Society Meeting 1999, Aug., 1999, pp. 310-313
- [7] 장석명, 서진호, 박찬일, 최상규, "영구자석의 Halbach 배열에 의한 자기회로 특성과 초고속전동기에의 응용", '96 대한전기학회 하계학술대회 논문집, pp. 71-73, 1996
- [8] 장석명, 서진호, 정상섭, 최상규, 함상용, "전기기계식 배터리 시스템용 초고속 전동발전기의 설계, 제작 및 모드별 특성" '99 전기학회논문지 Vol. 48B, No. 8, pp. 400-408, 1999
- [9] Isao Yakahashi et al., "A Super High Speed PM Motor Drive System by a Quasi-Current Source Inverter", IEEE Trans. Magnetics, Vol. 30, No. 3, pp. 683-690
- [10] Gordon R. Slemon and Xian Liu, "Core losses in permanent motors", IEEE Trans. on Magnetics, Vol. 26, No. 5, pp. 1653-1655, 1990
- [11] T. Sebastian and G. R. Slemon, "Transient Torque and Short Circuit Capabilities of Variable Speed Permanent Magnet Motors", IEEE Trans. Magnetics, Vol. MAG-23, No. 5, pp. 3619-3621, Sept., 1987
- [12] K. Halbach, "Design of Permanent Multipole Magnets with Oriented Rare Earth Cobalt Material", Nuclear Instruments and Methods, 169, pp. 1-10, 1980
- [13] John R. Reitz, Frederick J. Milford, and Robert W. Christy, Foundation of Electromagnetic Theory, United Publishing & Promotion Co., Ltd., pp. 186-196, 1984
- [14] 원종수역, 페라이트 자석회전기의 설계, 통일출판사, 1995
- [15] 정환명, 연제욱, 최재호, 고창섭, "초전도 플라이휠 에너지 저장시스템 개발", 전력전자학회 논문지 Vol.4, No.5, pp.433-441, 1999년 10월

저 자 소 개



고 창 섭 (高彰燮)

1964년 2월 18일생. 1986년 서울대 전기공학과 졸업(학사). 1988년 동 대학원 전기공학과 졸업(석사). 1992년 동 대학원 전기공학과 졸업(공학박). 1993년~1993년 미국 Florida Int'l university 전기 및 컴퓨터 공학과 객원연구원.

1994~1996년 삼성전기(주) 종합연구소 선임연구원. 1996~현재 충북대 전기전자공학부 조교수

Tel : 0431-261-2426



정 환 명 (鄭煥明)

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

Tel : 0431-261-2425, Fax : 0431-276-7217

E-mail : hmjeoung@power.chungbuk.ac.kr



연 제 옥 (延濟旭)

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

Tel : 0431-261-2426

E-mail : kaffa@engine.chungbuk.ac.kr



홍 계 원 (洪啓源)

1956년 4월 3일생, 1983년 한국과학기술원 졸업 (공학박), 1983년~현재 한국원자력연구소 책임연구원

Tel : 042-868-8024, Fax : 042-862-5496

E-mail : gwhong@kaeri.re.kr



최 재 호 (崔載昊)

1955년 9월 27일생. 1979년 서울대 전기공학과 졸업. 1981년 동 대학원 전기공학과 졸업(석사). 1985년 동 대학원 전기공학과 졸업(공학박). 1981년~1983년 중경공업전문대학 전자과 전임강사. 1983년~현재 충북대 공대 전기전자공학부 교수.

1993년~1994년, 1997년~1998년 University of Toronto(Visiting Professor).

Tel : 0431-261-2425, Fax : 0431-276-7217

E-mail : choi@power.chungbuk.ac.kr



이 호 진 (李浩鎭)

1958년 1월 28일생, 1980년 한양대 기계공학과 졸업, 1992년 한국과학기술원 정밀공학과 졸업 (공학박), 1985년~현재 한국원자력연구소 책임연구원

Tel : 042-868-2418, Fax : 042-862-5496

E-mail : hjleel@kaeri.re.kr