

전력변환기를 포함한 초소형 플라이휠 에너지 저장 시스템의 설계 Design of Flywheel Energy Storage System Including Power Converter

*강민우¹, 이학인², #노명규³

*M. W. Kang¹, H. I. Lee², #M. D. Noh(mnoh@cnu.ac.kr)³

¹충남대학교 BK21 메카트로닉스사업단, ²전력연구원, ³충남대학교 메카트로닉스공학과

Key words : Micro Flywheel, Flywheel Energy Storage System, Permanent Magnet Bearing, Toroidally-wound BLDC machine

1. 서론

최근 전 세계적으로 녹색기술에 대한 관심이 높아지며 신재생 에너지를 사용하려는 노력이 증가되고 있다. 그러나 태양광, 풍력과 같은 신재생에너지는 에너지 출력의 변화가 심하다는 문제점을 가지고 있다. 이러한 문제를 해결하고 부하평준화와 신뢰성 확보를 위해 여러 가지 에너지 저장기술이 개발되었다. Fig. 1은 연료전지와 화학전지 등의 단위 무게 당 출력과 단위 무게 당 저장에너지 사이의 관계를 보여준다[1]. 여기서 플라이휠 에너지 저장 시스템은 가장 높은 에너지 밀도를 보여준다.

플라이휠 에너지 저장 장치는 입력되는 잉여 전기에너지를 플라이휠의 회전 운동에너지로 변환하여 저장하고 필요시 전기 에너지로 출력하는 장치이다. 플라이휠 에너지 저장 장치는 산업용, 민수용, 및 국방용 등의 다양한 용도(대용량 비상전원, 신재생 에너지 저장 장치, 전력 품질 조절기 등에 사용되고, 부하 조건이 변하는 시스템의 안정적인 전력 수급을 위한 보조 수단으로도 사용이 가능하며 원가절감, 생산성 향상, 전력 공급 안정성 향상, 무공해 또는 저공해, 저연비 제품의 개발로 기여 할 수 있다. 이러한 효과와 더불어 소형의 플라이휠 시스템은 이동의 편의성, 휴대성 등의 장점까지 추가되어 개인용, 군사용 배터리 등에 적용이 가능하고, 고속 회전체 설계 및 제어기술, 자기부상 제어 기술, 고효율 전동기 기술 등이 집적된 최첨단 에너지 저장 시스템이라 할 수 있다. 이전 논문에서는 초소형 플라이휠 시스템의 에너지 저장 용량과 관계가 깊은 임계속도를 최대로 높일 수 있는 요소설계에 대한 방법을 제시하였다[2]. 본 논문에서는 요소설계를 바탕으로하여 시스템 단위의 최적화된 초소형 플라이휠 시스템을 제시하고, 플라이휠의 변화하는 속도에서 일정한 전기에너지를 출력할 수 있는 전기회로를 제시하고자 한다.

2. 모델링 및 설계

2.1 시스템 레이아웃

Fig.2는 초소형 플라이휠 에너지 저장 장치의 시스템의 개략도이다. 회전자의 중심에 작은 플라이휠이 위치하며 모터와 베어링을 위한 영구자석으로 구성되어있다. 회전자와 고정자의 자기베어링은 환형의 영구자석으로 구성되어 있으며 서로 척력 내도록 자화되어 있다. 수동형 영구자석의 설계와 분석은 [2]에서 참조하였고 축 방향의 제어를 위해서 보이스코일 구동기를 사용하였다. 모터/발전기는 환형권선 브러시리스 직류전동기 사용하며 회전자의 자석과 고정자의 코일 사이에서 회전력이 발생한다. 발전 시에는 자석의 회전으로 생성되는 전기적인 힘은 변환 회로를 통하여 직류 전압으로 변환된다.

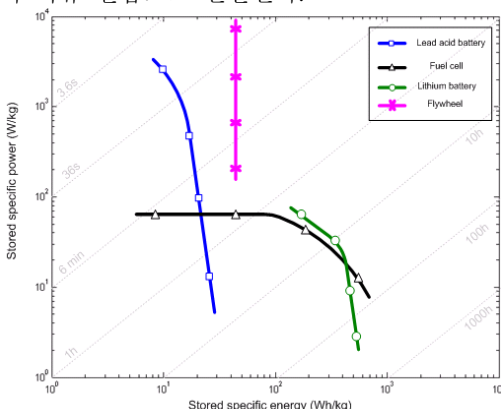


Fig. 1 Ragone plot of existing power sources

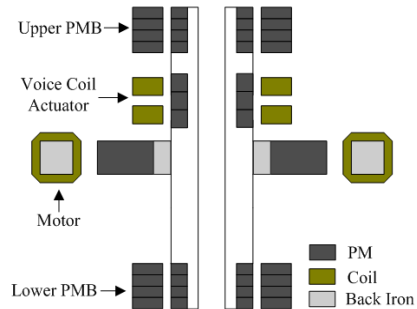


Fig. 2 Schematic diagram of micro flywheel energy storage system

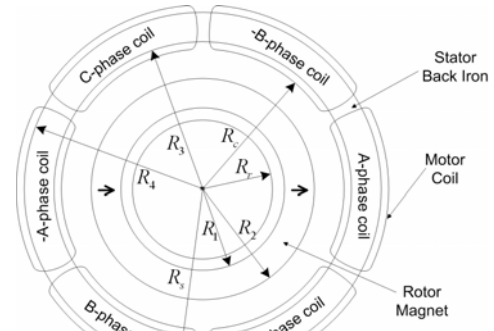


Fig. 3 The geometry of a toroidally-wound BLDC motor

2.2 영구자석 베어링

영구자석 자기베어링의 설계목표는 주어진 자석의 부피에서 반경방향으로의 최대강성을 만들어 내는 것이다.

베어링 반경 방향 강성은 고정자 및 회전자 자석의 두께, 공극의 길이, 축 방향 길이, 자석의 세기 등에 의해 결정되며 이러한 관계를 등가 진류판 방법[3]을 이용하면 이러한 관계를 해석적으로 구할 수 있으며 이를 통해 영구자석 베어링을 설계 할 수 있다[2].

2.3 환형권선 브러시리스 모터

Fig. 3은 2극 환형권선 브러시리스 직류전동기의 기본 구조이다. 고정자 철심은 3상 입력을 가지며 2개의 그룹으로 나뉘는 6개의 코일을 지지한다. 한 코일에 의해 생성되는 자화는 쌓이 되는 위상에 의해 상쇄되기 때문에 철심에는 아주 작은 히스테리시스 손실만 생기게 된다.

모터의 설계 방정식은 해석적으로 구할 수 있는데 만약 스칼라 포텐셜 ψ 가 $H = -\nabla\psi$ 을 만족하면 전자기학의 맥스웰 방정식은 아래와 같고[4],

$$\nabla^2\psi = \nabla \cdot \mathbf{M} \quad (1)$$

위의 식에서 회전자 자석의 자화 벡터 \mathbf{M} 은 다음과 같다.

$$\mathbf{M} = H_c \cos\theta \hat{\mathbf{r}} \quad (2)$$

(1)의 식은 적당한 경계조건을 적용하여 풀 수 있다. 이 식 (1)을 풀 후에 얻어진 공극에서의 자속밀도는 다음과 같이 구할 수 있다.

$$B_r = \mu_0 H_c \left[\left(\frac{R_2}{R_3} \right)^2 - \left(\frac{R_1}{R_3} \right)^2 \right] \left[1 + \left(\frac{R_3}{r} \right)^2 \right] \cos\theta \quad (3)$$

토크는 전체 코일영역에서의 자속 밀도를 합하여 구할 수 있다. 이 결과로 a-위상에 대한 토크방정식을 다음과 같이 구할

수 있다.

$$T_a = k_b k_r (\mu_0 H_c) N_a I_a \cos \theta_a \quad (4)$$

(4)의 식에서 너비상수 k_b 는 다음과 같이 정의된다.

$$k_b = \frac{\sin(\theta_c/2)}{\theta_c/2} \quad (5)$$

반경상수 k_r 은 다음과 같이 정의된다.

$$k_r = \frac{4R_3^2 + R_3 R_c + R_c^2}{3(R_3^2 - R_1^2)(R_3 - R_c)} \times \left[\frac{1}{2}(R_2^2 - R_1^2) + R_1^2 \log\left(\frac{R_2}{R_1}\right) \right] \quad (6)$$

3상의 토크를 더하면 토크방정식은 다음과 같다.

$$T = 3k_b k_r (\mu_0 H_c) N I_0 \quad (7)$$

2.4 보이스 코일 구동기

수동형 자기베어링은 반경 방향 안정성을 제공하지만 축 방향 불안정성을 야기 시킨다. 그러므로 모든 방향의 자기부상 제어를 위해 넓은 주파수 대역과 신형적인 특징을 가지는 보이스 코일 구동기를 사용하였다. Fig. 4는 보이스 코일 구동기의 구조이다. 보이스 코일 구동기는 회전자 영구자석과 고정자 코일로 구성되어 있다. 회전자 영구자석은 Halbach 자화 패턴을 가지고 있으며 세 개의 층으로 이루어져 있다. 한 쌍의 고정자 코일은 동일한 크기의 전류가 서로 반대로 흐르도록 직렬로 연결되어 있다. 고정자 코일에 전류가 흐르면 로렌츠 힘이 발생하여 축 방향 힘이 발생한다. 구동기의 설계목표는 최대의 로렌츠 힘이 주어졌을 때 최소의 전력손실이 이루어지도록 하는 것이다. 최적화 설계의 코일 상수는 다음과 같다.

$$k_{vca} = \frac{1}{t_l c \sqrt{R}} \int_{x_c}^{x_c+t_c} \int_{x_c}^{x_c+t_c} B(x, y) dy dx \quad (8)$$

3. 시스템 단위 최적화

에너지 저장장치의 목표는 단위 무게 당 최대의 에너지를 저장하는 것이다. 그래서 초소형 플라이휠 에너지 저장장치의 시스템 레벨에서 목적함수는

$$J = \frac{E}{m} \quad (9)$$

E 는 저장된 에너지, m 은 질량이다. 플라이휠에 의해 저장되는 회전 에너지는 다음과 같이 표현된다.

$$E = \frac{1}{2} I_p \Omega^2 \quad (10)$$

I_p 는 극관성 모멘트이고 Ω 는 플라이휠의 회전속도이다. 초소형 플라이휠 에너지 저장 장치의 최대속도는 플라이휠의 강성과 고유주파수 특성에 의해 결정된다. 재료 강성은 원심력에 의하여 깨짐 현상이 일어나기 전까지의 회전속도를 한계 짓는다. 전형적으로 대형 플라이휠 시스템에서 복합재료를 사용하여 빠른 속도에 의한 큰 원심력에도 강인하다. 그러나 재료강성 보다는 진동 특성에 의한 최대 속도가 더 낮으므로 고유 주파수에 의하여 최고 속도가 결정되게 된다. 고유 주파수 이하에서의 진동은 영구자석에의 한 작은 감쇠로도 안전하다. 또한 강제 모드를 넘어 갈수 있다면 더 높은 속도로 플라이휠의 회전이 가능 할 것이다. 본 논문에서는 회전 속도 범위를 첫 번째 강제 모드 이하로 정하고 다음과 같이 나타 낼 수 있다.

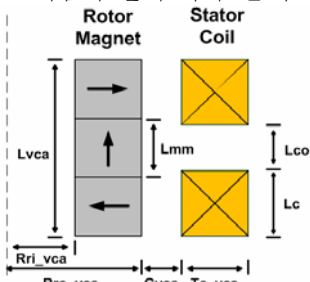


Fig. 4 Structure and design parameters of the voice coil actuator

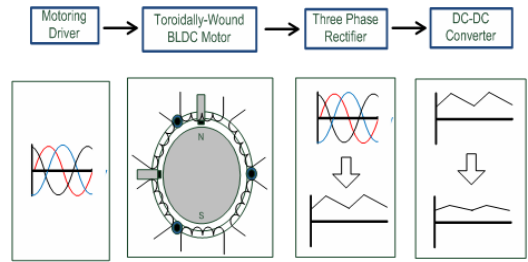


Fig. 5 Topology of a power conversion circuit for a MFESS

$$\omega_n = \sqrt{\frac{2k_r}{m}} \quad (11)$$

k_r 은 수동형 영구자석 베어링의 반경방향 강성을 나타낸다. 따라서 시스템 레벨의 최적화는 전체적인 시스템의 질량을 최소화 하고 수동형 영구자석 베어링의 강성을 최대화하는 것에 있다.

4. 전력변환

Fig. 5는 기본적인 전력변환 과정이다. 우선 전력을 사용하여 플라이휠을 회전시킨다. 회전하는 플라이휠의 모터 코일에는 유도전압이 발생한다. 발생한 유도전압은 3상의 사인파 형태를 가지는데 이를 3상 정류기를 통하여 정류 시킨다. 정류된 DC전압을 DC-DC컨버터를 사용하여 리플을 감소시키며 원하는 전압을 얻어낸다. 여기서 발생하는 유도전압은 모터의 회전속도에 따라 진폭, 주파수가 변화한다. 그러므로 회전속도의 변화에 따른 되먹임 제어를 통해 일정한 출력을 낼 수 있도록 하였다.

5. 결론

본 논문에서는 영구자석 베어링과 보이스 코일 구동기로 지지되어 고속 회전이 가능한 플라이휠 에너지 저장 시스템을 제안하였다. 각각의 요소들은 에너지 밀도를 최대화하도록 최적화 되었다. 또한 변화하는 속도에도 일정한 전원을 전력 변환기를 설계하였다. 추후 과제로는 실험을 통한 설계의 검증이 남아있다.

참고문헌

1. D. Dunn-Rankin, E. M. Leal and D. C. Walther, "Personal Power Systems," Progress in Energy and Combustion Science Vol. 31, Issues 5-6, pp. 422-465, 2005.
2. S. Y. Yoo, H. C. Lee and M. D. Noh, "Optimal Design of Micro Flywheel Energy Storage System," in the Proceeding of International Conference on Control, Automation and System (ICCAS2008), Seoul, Korea, 2008.
3. M. D. Noh, J. F. Antaki, M. Ricci, et. al, "Magnetic design for the PediaFlow ventricular assist device," Artificial Organs, Vol. 32, No. 2, pp. 127-135, 2007.
4. E. P. Furlani, "Permanent Magnet and Electromechanical Devices", Academic Press, 2001.