

환형권선 셀프베어링 모터의 모델링

Modeling of Toroidally-wound self-bearing Motor

*이학인¹, 유승열¹, #노명규²

*H. I. Lee(hilee@cnu.ac.kr)¹, S. Y. Yoo(usyeol@hotmail.com)¹, #M. D. Noh(mnoh@cnu.ac.kr)²

¹충남대학교 BK21 메카트로닉스 사업단, ²충남대학교 메카트로닉스 공학과

Key words : Self-bearing motor, Bearingless motor, Toroidally wound BLDC Motor

1. 서론

자기 부상 기술이 발전함에 따라 비접촉 부상에 의한 회전체의 지지가 가능해졌다. 이 기술에 의하여 마찰 손실은 줄일 수 있었지만 기존 베어링에 비해 축 길이가 늘어나는 경향이 있고 이로 인한 회전체의 임계속도가 저하된다. 이러한 문제점들을 해결하고 소형화, 경량화, 단순화를 위하여 1990년대부터 셀프 베어링 모터(Self-Bearing Motor, SBM)에 대한 연구가 진행되었다[1]. 셀프 베어링 모터(SBM)는 베어링리스 모터 혹은 자기 베어링 내장 모터 등으로 불리우고 모터에 자기 베어링 기술이 접목되어 모터 자체가 회전운동과 자기 부상 역할을 함께 수행 하는 것이다.

셀프베어링 모터(SBM)를 제어하기 위해서 맥스웰힘(Maxwell force)과 로렌츠힘(Lorentz force)을 이용하는 하이브리드 셀프베어링 모터 설계가 일반적으로 채용되고 있고 로렌츠힘 만을 이용하여 셀프베어링 모터의 설계도 이루어지고 있다[1]. 본 논문에서는 환형권선 브러시리스 DC 모터를 사용하여 로렌츠힘을 이용하여 부상력과 회전력을 생성할 것이다.

환형권선 브러시리스 DC 모터는 영구자석을 포함하는 회전자와 삼상 권선을 지지하는 환형 철심 고정자로 이루어져 있다[2]. 이 모터는 고정자 철심내의 자속밀도 변화가 매우 작아 철심내의 와전류와 히스테리시스에 의한 철손을 최소화 할 수 있다. 또한 큰 공극에서 사용이 가능하여 변속펌프[3], 인공심장[4]등의 구동에 사용된다.

환형권선형 셀프베어링 모터를 설계하면서 부상력과 회전력이 각각의 전류에 의해 독립적으로 구동이 됨을 이론적으로 증명해보고 셀프베어링 모터를 구동할 때 생기는 특이점 문제(Singularuty Problem)를 해결하기 위해서 새로운 방법인 "Coil Selector" 방법을 소개하고 시뮬레이션을 사용하여 계산되는 제어 전류를 통해 이 방법의 증명을 해 보았다.

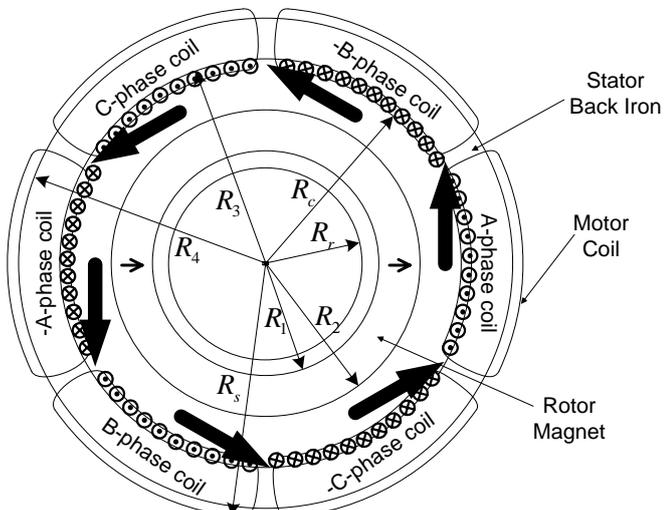


Fig. 1 Generated lorentz force in the toroidally-wound BLDC motor

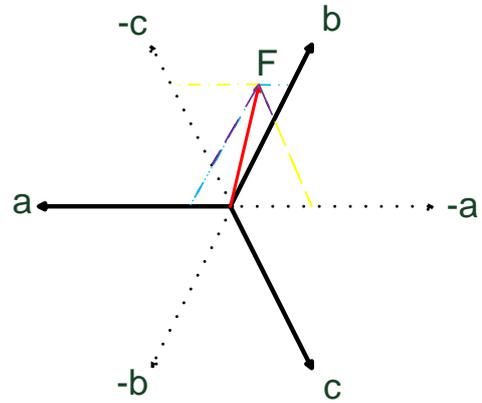


Fig. 2 Three methods of vector decomposition by a, b, c coordinate for one force vector

2. 회전전류와 자기부상 전류의 분해

환형권선 셀프베어링 모터는 하나의 권선으로 회전과 자기 부상을 동시에 수행하게 된다. 이 두 가지 역할을 위한 입력전류는 하나의 코일에서 이루어져야 한다. 또한 각각의 역할에 맞는 전류가 서로 영향을 미치지 않음을 증명하고 입력전류를 합하여 넣어 주어야 한다.

Fig. 1은 환형권선 모터의 형상과 파라미터의 정의를 보여준다. 환형권선 셀프 베어링 모터의 수학적 모델을 구하는 첫 번째 단계는 공극 내에서의 자속밀도 분포를 구하는 것이다[5]. 자속 밀도는

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

와 같이 구해진다. 여기서 μ_0 는 공기의 투자율, H_c 는 회전자 자석의 보자력을 나타낸다. 자속 밀도 분포를 통해서 각 코일에서 발생하는 로렌츠힘을 구할 수 있다. 예를 들면 (+A)~(-A) 코일에서 발생하는 토크는

$$T_a = \int_{R_c, \theta_a - \theta_c / 2}^{R_3, \theta_a + \theta_c / 2} \frac{2N_a I_a}{(R_3^2 - R_c^2)\theta_c} B_r r^2 d\theta dr \quad (2)$$

로 부터 구할 수 있다. 여기서 N_a 는 코일 턴 수, θ_c 는 코일이 감기는 각도, I_a 는 입력전류이다.

토크를 만들어 주기 위한 입력전류를 보면 회전을 위한 I_m , 자기부상을 위한 I_a 로 나누어 살펴 보면

$$I_{+A} = I_m \cos \omega_m t + I_a$$

$$I_{-A} = -I_m \cos \omega_m t + I_a \quad (3)$$

와 같다. 두 전류는 한 상의 코일에서 작동하게 되지만 이론적으로 서로 영향을 미치지 않는다.

3. Coil Selector

환형권선 셀프 베어링 브러시리스 모터의 자기 부상력을 만들어주기 위해서는 회전력과 같이 로렌츠힘 방법이 사용되는데 Fig. 1에서의 회전력을 서로 대칭하게 늘려주고

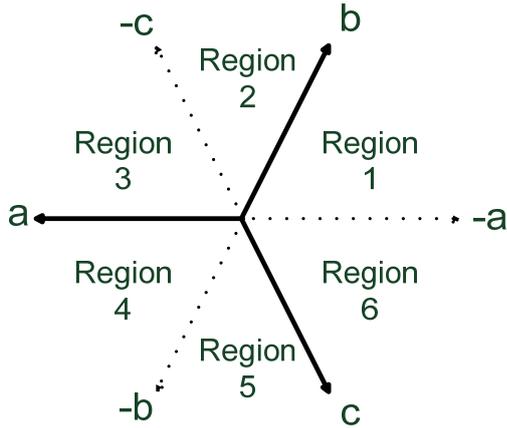


Fig. 3 The region of coil selector

줄여주게 되면 회전력의 불균형의 의하여 X 방향, Y 방향의 힘을 만들어 줄 수 있다. 이러한 하드웨어적 위치를 적용한 로렌츠힘 좌표를 사용하여 자기 부상력과 전류의 관계를 정리 하면

$$\begin{bmatrix} F_x \\ F_y \end{bmatrix} = k_b J_o N \begin{bmatrix} 0 & \sqrt{3} \cos(\omega_m t + \frac{2}{3} \pi) & -\sqrt{3} \cos(\omega_m t - \frac{2}{3} \pi) \\ 2 \cos(\omega_m t) & -\cos(\omega_m t + \frac{2}{3} \pi) & -\cos(\omega_m t - \frac{2}{3} \pi) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_a \\ I_b \\ I_c \end{bmatrix} \quad (4)$$

$$J_o = \frac{\beta_o \rho_1}{R_3^2 - R_c^2} \left[\frac{1}{2} (R_3^2 - R_c^2) + R_3^2 \log \left(\frac{R_3}{R_c} \right) \right]$$

$$\rho_1 = \frac{1}{2} (R_2^2 - R_1^2) + R_1^2 \log \left(\frac{R_2}{R_1} \right), \quad \beta_o = \frac{\mu_o M_o}{2(R_2^2 - R_1^2)}$$

와 같이 정리된다. 여기서 k_b 는 너비상수[5], ω_m 은 코사인 파형인 자화밀도의 회전속도이고 앞의 상수는 로렌츠힘 좌표에서의 a, b, c 상의 하드웨어적 방향을 나타내준다.

식 (4)에서 힘과 전류의 관계식이 역행렬을 수행하기 위한 정방행렬이 아니다. 역행렬을 사용하여 구할 수 없기 때문에 회전체의 중심 이탈 변위에 대하여 필요한 힘을 만들어 주기 위한 입력 전류를 구할 수 없다. 이를 해결하기 위하여 본 논문에서는 “Coil Selector” 방법을 제안하고자 한다. 이 방법은 벡터 분해를 이용하여 Fig. 2 에서와 같이 하나의 필요한 힘을 3 가지 방법으로 만들어 줄 수 있는데 3 상의 코일 중에서 2 개의 코일만을 사용하여 필요한 힘을 만들어 주는 방법으로 2x3 행렬을 2x2 행렬로 바꾸어 주어 역행렬이 가능하게 변환 해줄 수 있다.

“Coil Selector” 방법은 또한 회전자의 극에 따라 Cos 함수 형태의 자속 밀도를 갖기 때문에 Cos 함수가 0 인 점을 갖을 때 발생하는 특이점 문제(Singularity Problem)를 해결 해준다. Fig. 3 에서 나누어진 영역은 자속밀도가 갖는 코사인 함수의 위상값이 0.5 가 되는 점을 기준으로 나누어 주어 60 도 간격으로 6 개의 영역이다. 이 영역은 자속밀도의 방향과 회전 방향에 따라 영역이 바뀌게 되고 엔코더를 사용하여 자기장의 위치를 검출하여 영역에 따른 구동 코일이 선택 되게 된다.

선택된 구동 코일에 따라 식(3.1)에서 I_a, I_b, I_c 중 하나가 사라지게 된다. 예를 들어 2 극의 자석을 사용하고 N 극의 위치가 오른쪽을 향하고 반 시계 방향으로 회전하고 있을 경우 코일을 선택하게 되는 범위는 Fig. 3 에서와 같이 영역 1 일 때는 c 상이 0 이고 I_a, I_b 로 이루어진 식을 통해 정방행렬로 변환하여 역행렬을 사용하여 필요한 로렌츠힘을 구하기 위한 입력전류를 구할 수 있다.

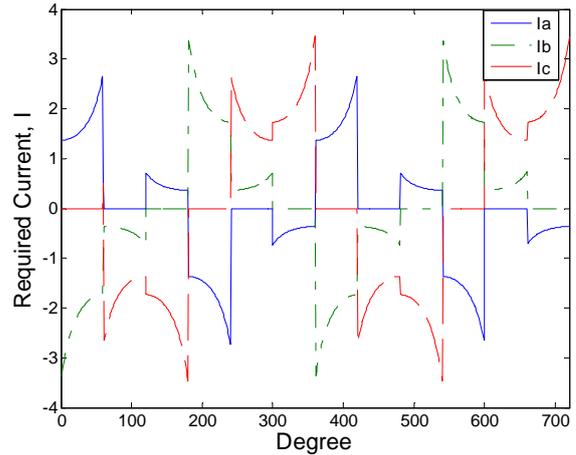


Fig. 4 Required currents of a, b, c phases at the position $x=-3, y=-1$

4. Mathematical Simulation

환형권선 셀프 베어링 모터의 수학적 모델링과 시뮬레이션 하였다. Fig. 4 는 모델링과 “Coil Selector”를 통해서 실제로 회전체의 변위에 따라 변하는 입력전류의 결과이다. 회전체의 위치가 $x=-3, y=-1$ 방향에 있을 때 로렌츠힘은 $x=3, y=1$ 방향으로 생성되어야 한다. 이러한 변위에 위치해 있고 회전자가 회전을 통해 자속밀도의 값이 위치의 변화에 따라 변하게 되고 “Coil Selector”에 의하여 60 도의 간격으로 입력전류는 $C=0, A=0, B=0$ 이 되고 이때 목적 힘은 나머지 두 개의 위상을 내주는 코일에 의해 벡터 합으로 생성 된다.

5. 결론

환형권선 셀프 베어링 모터를 제어하기 위해서 새로운 방법인 “Coil Selector”를 사용하였다. 이 방법을 통해서 셀프 베어링 모터의 큰 문제점이었던 특이점 문제(Singularity Problem)를 해결 하였다. 이러한 방법을 회전전류와 자기부상 전류의 분리를 수학적 방법으로 증명하였고, “Coil Selector”방법과 함께 회전자의 변위가 생겼을 때 제어전류를 계산하여 시뮬레이션을 해보았다. 그 결과 회전자의 변위를 보상하기 위해 생성되는 힘과 같은 방향과 크기를 갖는 로렌츠힘이 나오는 것을 확인 할 수 있었고 제어 가능함을 증명 하였다. 시뮬레이션을 통해 증명된 “Coil Selector”를 사용하여 환형권선 셀프베어링 모터의 프로토타입을 제작 후 실험하여 초소형 플라이휠 에너지 저장 장치에 적용 될 것이다.

참고문헌

1. A. Chiba T. Deido, M. Oshima, et. Al, “Magnetic Bearingless Drives,” Nenes Elsevier, Burlington, England, 2005
2. L. W. Langley and R. L. Fisher, “Toroidally-Wound Brushless DC Motor,” US Patent 4,547,713, 1985
3. F. Caricchi, F. Crescimbin, and O. Honorati, “Low-Cost Compact Permanent Magnet Machine for Adjustable-Speed Pump application,” IEEE Transactions on Industry Application, Vol 34, No. 1, pp109-116, 1998
4. M. D. Noh, J. F. Antaki, M. Ricchi, et. Al, “Magnetic design for the PediaFlow ventricular assist device,” Artificial Organs, Vol. 32, pp 127-135, 2008
5. H. I. Lee and M. D. Noh, “Optimal Design of Toroidally-Wound Brushless DC Machines,” in the Proceeding of International Conference on Industrial Technology, Melbourne, Australia, 2009