

3 자유도 4극 스피리컬 영구자석형 전동기의 회전자계 연구

고성철*, 강동우*, 김승주**, 원성훈***, 이주*
 한양대학교*, LG전자**, 동양미래대학***

A Study on Rotating Field of 4 Poles Spherical PM Motor with 3 D.O.F.

Sung-Chul Go*, Dong-Woo Kang*, Seung-Ju Kim**, Sung-Hong Won***, Ju Lee*
 Hanyang University*, LG Electronics**, DongYang Mirae University***

Abstract - 스피리컬 전동기의 적용대상인 기존의 다자유도 시스템은 다수의 전동기를 동시에 제어해야 하므로 제어성과 전력공급면에서 단점을 갖는다. 하나의 전동기로 다 자유도 시스템을 구현할 수 있는 스피리컬 전동기는 출력 밀도 측면에서 영구자석을 이용한 형태의 연구가 주로 진행되고 있는데, 세계적으로 기초연구 단계에 있다. 스피리컬 영구자석형 전동기를 구현하기 위해서는 회전자를 지지하면서 3자유도 구현이 가능한 구조적인 설계, 3자유도의 전동력의 발생 메커니즘 설계, 3차원 전자기 해석 및 제어알고리즘 구현이 필요하다. 회전축이 기울어진 상태에서 회전자계를 발생시키는 식이 보고되고 있으나 회전형 전동기와 달리 공증된 회전자계 식이 없는 상황이다. 본 연구에서는 전류벡터를 이용한 회전자계 식에 대한 연구를 진행하였다.

방향벡터의 크기가 1인 조건을 이용하여 회전축의 위치를 식 (3)과 같이 구할 수 있다.

$$\begin{aligned} \theta_\alpha &= \text{atan2}(s_z, \sqrt{s_x^2 + s_y^2}) \\ \theta_\beta &= \text{atan2}(s_x, s_y) \end{aligned} \quad (3)$$

2.2 기존의 4극 스피리컬 전동기의 회전자계

기본 회전자계 식은 한 상의 위아래 코일을 하나의 쌍으로 설정하여 인가되어야 할 전류 크기를 먼저 결정하고 이를 회전축의 기울임에 따라 cos 함수를 이용하여 위, 아래 코일이 $2\theta_c$ 만큼 떨어져 있을 때 전류비가 조절가능한 기존의 4극 스피리컬 전동기의 경우 식 (4)와 같다.[1]

$$\begin{aligned} i_{au} &= i_{ad} = I_m \cos\left(\frac{\pi}{4} + \frac{\pi}{4\theta_c} \theta_\alpha \cos(\theta_\beta)\right) \cos(\omega t + 2\theta_\beta) \\ i_{bu} &= i_{bd} = I_m \cos\left(\frac{\pi}{4} + \frac{\pi}{4\theta_c} \theta_\alpha \cos(\theta_\beta - \frac{\pi}{3})\right) \cos(\omega t + 2\theta_\beta - \frac{2\pi}{3}) \\ i_{cu} &= i_{cd} = I_m \cos\left(\frac{\pi}{4} + \frac{\pi}{4\theta_c} \theta_\alpha \cos(\theta_\beta - \frac{2\pi}{3})\right) \cos(\omega t + 2\theta_\beta + \frac{2\pi}{3}) \\ i_{du} &= i_{ad} = I_m \cos\left(\frac{\pi}{4} + \frac{\pi}{4\theta_c} \theta_\alpha \cos(\theta_\beta - \pi)\right) \cos(\omega t + 2\theta_\beta) \\ i_{eu} &= i_{bd} = I_m \cos\left(\frac{\pi}{4} + \frac{\pi}{4\theta_c} \theta_\alpha \cos(\theta_\beta + \frac{2\pi}{3})\right) \cos(\omega t + 2\theta_\beta - \frac{2\pi}{3}) \\ i_{fu} &= i_{cd} = I_m \cos\left(\frac{\pi}{4} + \frac{\pi}{4\theta_c} \theta_\alpha \cos(\theta_\beta + \frac{\pi}{3})\right) \cos(\omega t + 2\theta_\beta + \frac{2\pi}{3}) \end{aligned} \quad (4)$$

회전자계의 합성자계는 일정한 ω 의 속도로 회전해야 하며 회전자도 동일한 속도로 회전할 수 있어야 한다. 회전축이 기울어진다면 회전축의 기울임 방향에 따라서 X-Y 평면상에서는 회전자계가 일정한 간격으로 회전하더라도 회전자의 회전각도에는 오차가 존재하며 표 <1>과 같다.

1. 서 론

회전형 전동기에서 A, B, C 3상 권선이 전기적으로 120° 위치에 권선되고, 각 상의 전류 파형이 120° 위상차를 가지고 인가됨으로써 회전자계를 형성한다. 스피리컬 전동기의 경우는 회전축이 항상 수직상태로만 존재하는 것이 아니며 회전 궤적상에 상코일이 항상 존재하는 것이 아니기 때문에 회전축의 위치에 따라서 코일별 전류의 크기도 달라진다.

일반적인 3자유도 스피리컬 전동기는 회전을 위하여 기본적으로 3상의 코일을 가지고 있다.[2][3] 각 상의 코일은 수평면을 기준으로 위쪽과 아래쪽의 한 쌍의 코일을 가지며 전류비를 조절하여 회전축의 기울임을 구현한다.[1] 따라서 2극의 3자유도 영구자석형 스피리컬 전동기의 경우 기본적으로 위쪽의 3상 코일과 아래쪽의 3상 코일이 필요하며 총 6개의 코일에 독립적으로 전류를 인가할 수 있는 구조를 갖는다. 4극의 경우는 총 12개의 코일이 필요하지만, 원점을 기준으로 서로 마주보는 코일의 경우 동일한 전류가 흐르게 되는 대칭구조가 발생하므로 6개의 코일의 전류를 제어하여 전체 12개의 코일에 원하는 전류를 공급할 수 있다.[5]

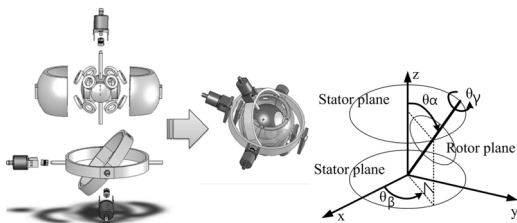
2. 본 론

2.1 4극 스피리컬 전동기의 기본구조

위쪽 Au - Fu의 6개의 코일과 아래쪽 Ad - Fd의 6개의 코일이 있다. 4극 회전자는 프레임 구조에 의하여 지지된다. X, Y 축 엔코더는 항상 회전자를 기준으로 회전축에 수직하게 그림 1과 같이 구성되어 있으며 이 때의 회전축과 회전자의 회전각도를 $\theta_\alpha, \theta_\beta, \theta_\gamma$ 로 표현할 수 있다. 그리고 X, Y 축에 의하여 측정된 각도 정보를 θ_x, θ_y 로 정의한다.

<표 1> 일정 회전자계 속도에서 회전축 위치에 따른 최대 각도 오차

θ_α (°)	θ_β (°)	최대오차(°)	θ_α (°)	θ_β (°)	최대오차(°)
0	0	0	10	0	0.44
10	45	0.44	10	90	0.44
30	0	4.12	30	45	4.12



<그림 1> 구조 및 각도 정의

θ_α 에 따라서 최대 오차 크기는 결정이 되며 θ_β 에 따라서 최대 오차가 발생하는 지점의 위치가 달라진다. 최대오차는 회전자계가 회전축이 기울었을 경우 기울어진 지점을 지날 때 X-Y평면과 만나는 지점을 통과할 때는 발생하지 않았으며 그 중간영역에서 발생하는 것을 확인할 수 있었다.

회전축의 기울임에 대한 위치정보를 식 (1)과 같이 정의하면 X, Y 축에 설치된 Encoder의 각도정보는 식 (2)와 같은 관계가 성립하며 회전자의 회전위치는 회전축에 부착된 Encoder를 이용하여 계산할 수 있다.

2.2 제한한 4극 스피리컬 전동기의 회전자계

이를 보완하기 위하여 코일의 위치벡터를 이용하여 합성자계를 결정하도록 하며, 합성자계가 회전자가 회전하는 평면상에 존재하도록 하여 일정한 속도회전하도록 한다. 회전자의 자극이 ωt 로 일정하게 회전하고 있다는 조건하에서 식 (5)와 같이 Z-Y-Z Euler각인 α, β, γ 를 이용하여 X-Y 평면상의 자극의 위상각도를 구해야 한다.[4]

$$\begin{aligned} S &= s_x a_x + s_y a_y + s_z a_z \quad (1) \\ \tan(\theta_x) &= \frac{-s_y}{s_z}, \quad \tan(\theta_y) = \frac{s_x}{s_z} \quad (2) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \alpha &= \theta_\beta \\ \beta &= \theta_\alpha \\ \gamma &= \theta_r - \theta_\beta \\ \theta_r &= \omega t \end{aligned} \quad (5)$$

여기서 θ_r 은 회전축에 부착된 엔코더의 각도정보이다.

자극이 초기에 x축과 일치한 방향으로 위치했을 경우 회전축이 임의의 $\theta_\alpha, \theta_\beta, \theta_r$ 의 각도조건을 나타낼 때 자극의 고정좌표계상의 위치는 식 (6)과 같고, X-Y 평면에 사영한 각도 θ_s 는 식 (7)과 같이 구할 수 있다.

$$\begin{aligned} \begin{bmatrix} a_{x,s} \\ a_{y,s} \\ a_{z,s} \end{bmatrix} &= R_{ZYX}(\theta_\beta, \theta_\alpha, \theta_r - \theta_\beta) \begin{bmatrix} 1 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} \\ &= \begin{bmatrix} C_{\theta_\beta} C_{\theta_\alpha} C_{\theta_r - \theta_\beta} - S_{\theta_\beta} S_{\theta_r - \theta_\beta} - C_{\theta_\alpha} C_{\theta_r - \theta_\beta} - S_{\theta_\beta} C_{\theta_r - \theta_\beta} C_{\theta_\alpha} S_{\theta_\alpha} \\ S_{\theta_\beta} C_{\theta_\alpha} C_{\theta_r - \theta_\beta} + C_{\theta_\beta} S_{\theta_r - \theta_\beta} - S_{\theta_\beta} C_{\theta_\alpha} S_{\theta_r - \theta_\beta} + C_{\theta_\beta} C_{\theta_r - \theta_\beta} S_{\theta_\alpha} S_{\theta_\alpha} \\ -S_{\theta_\alpha} C_{\theta_r - \theta_\beta} & S_{\theta_\alpha} S_{\theta_r - \theta_\beta} & C_{\theta_\alpha} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} \\ &= \begin{bmatrix} C_{\theta_\beta} C_{\theta_\alpha} C_{\theta_r - \theta_\beta} - S_{\theta_\beta} S_{\theta_r - \theta_\beta} \\ S_{\theta_\beta} C_{\theta_\alpha} C_{\theta_r - \theta_\beta} + C_{\theta_\beta} S_{\theta_r - \theta_\beta} \\ -S_{\theta_\alpha} C_{\theta_r - \theta_\beta} & S_{\theta_\alpha} S_{\theta_r - \theta_\beta} \end{bmatrix} \end{aligned} \quad (6)$$

$$\theta_s = \text{atan2}(S_{\theta_\beta} C_{\theta_\alpha} C_{\theta_r - \theta_\beta} + C_{\theta_\beta} S_{\theta_r - \theta_\beta}, C_{\theta_\beta} C_{\theta_\alpha} C_{\theta_r - \theta_\beta} - S_{\theta_\beta} S_{\theta_r - \theta_\beta}) \quad (7)$$

코일쌍 Au-Ad, Bu-Bd, Fu-Fd의 합성 기자력 크기는 식 (8)과 같다.

$$\begin{aligned} |Au, Ad| &= I_m \cos(\theta_s) \\ |Bu, Bd| &= I_m \cos(\theta_s - 2\pi/3) \\ |Fu, Fd| &= I_m \cos(\theta_s + 2\pi/3) \end{aligned} \quad (8)$$

C, D, E 코일의 전류는 F, A, B 코일의 위아래 크기가 뒤집어진 형태로 나타난다. 다음으로 각 코일의 위아래 권선의 합성 기자력의 z축 성분을 구해야 한다. 이는 회전축의 위치가 결정되면 회전축이 고정된 상태로 회전할 때 자극이 이동하는 경로가 결정되므로 회전축의 위치에 의하여 코일별 기자력 비율이 고정된다. Au-Ad 코일쌍의 사이로 자극이 θ_{Az} 만큼 수평면에서 떨어져서 지나가게 될 경우 이 각도는 회전축의 방향벡터 $[a_{xr}, a_{yr}, a_{zr}]^T$ 를 법선으로 갖는 평면의 식 (9)에 Au-Ad코일쌍의 위치벡터의 X-Y 평면상의 값을 고려한 좌표값 (1,0,z)를 대입하여 z축 좌표값 식 (10)과 같이 구하고 식 (11)과 같이 θ_{Az} 를 구할 수 있다.

$$\sin(\theta_\alpha) \cos(\theta_\beta) x + \sin(\theta_\alpha) \sin(\theta_\beta) y + \cos(\theta_\alpha) z = 0 \quad (9)$$

$$\begin{aligned} x_A &= \cos(0), y_A = \sin(0) \\ z_A &= -\frac{\sin(\theta_\alpha) \cos(\theta_\beta)}{\cos(\theta_\alpha)} \end{aligned} \quad (10)$$

$$\theta_{Az} = \text{atan2}(z_A, \sqrt{x_A^2 + y_A^2}) = \text{atan2}\left(-\frac{\sin(\theta_\alpha) \cos(\theta_\beta)}{\cos(\theta_\alpha)}, 1\right) \quad (11)$$

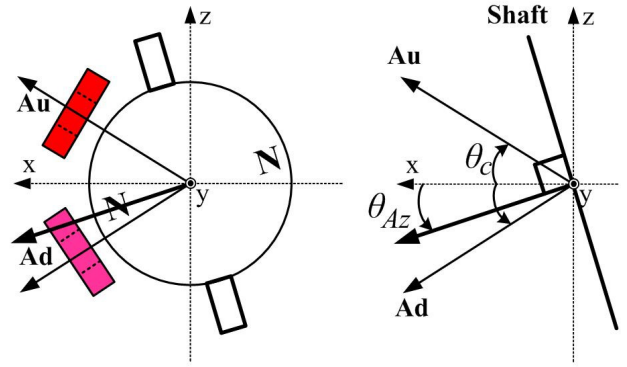
Au-Ad, Bu-Bd, Fu-Fd 코일쌍에서 회전축의 $\theta_\alpha = 20^\circ$, $\theta_\beta = 0^\circ$ 일 때 각 코일쌍 내부를 지나가는 자극의 각도 θ_s 는 표 <2>와 같다.

<표 2> 코일쌍에서의 자극이 지나가는 위치각도

코일쌍	Au-Ad	Bu-Bd	Fu-Fd
x	1	0.5	0.5
y	0	$\sqrt{3}/2$	$-\sqrt{3}/2$
z	-0.364	-0.182	-0.182
θ_s	-20°	-10.31°	-10.31°

Au-Ad 코일에서 자극이 지나가는 각도를 구한후 위아래 코일의 전류비를 결정하기 위하여 그림 <2>와 같은 관계를 생각해볼 수 있다. A상 의 위쪽코일의 전류의 크기를 i_{Au} , 아래쪽 코일의 전류의 크기를 i_{Ad} 로 정의하고 합성 전류를 수평축 성분과 수직축 성분으로 나누어서 식 (12)와 같이 구할 수 있다. θ_c 는 수평면 기준 코일의 위치각도를 의미한다.

$$\begin{aligned} i_{Au} \cos(\theta_c) + i_{Ad} \cos(\theta_c) &= |Au, Ad| \cos(\theta_{Az}) \\ i_{Au} \sin(\theta_c) - i_{Ad} \sin(\theta_c) &= |Au, Ad| \sin(\theta_{Az}) \\ i_{Au} &= \frac{|Au, Ad|}{2} \left(\frac{\cos(\theta_{Az})}{\cos(\theta_c)} + \frac{\sin(\theta_{Az})}{\sin(\theta_c)} \right) \\ i_{Ad} &= \frac{|Au, Ad|}{2} \left(\frac{\cos(\theta_{Az})}{\cos(\theta_c)} - \frac{\sin(\theta_{Az})}{\sin(\theta_c)} \right) \end{aligned} \quad (12)$$



<그림 2> Au-Ad 코일쌍에서 기자력 축의 위치 관계

12개의 코일 모두 수평면 기준 각도는 회전축의 위치가 특정되면 동일하게 유지되므로 서로의 차이는 각 코일쌍 내부를 지나는 회전평면의 각도, 즉 자극이 지나갈 때의 각도 $\theta_{Az}, \theta_{Bz}, \theta_{Cz}, \theta_{Dz}, \theta_{Ez}, \theta_{Fz}$ 에 의하여 결정되며 식 (13)과 같다.

$$\begin{aligned} i_{Au} = i_{Dd} &= \frac{|Au, Ad|}{2} \left(\frac{\cos(\theta_{Az})}{\cos(\theta_c)} + \frac{\sin(\theta_{Az})}{\sin(\theta_c)} \right) \\ i_{Ad} = i_{Du} &= \frac{|Au, Ad|}{2} \left(\frac{\cos(\theta_{Az})}{\cos(\theta_c)} - \frac{\sin(\theta_{Az})}{\sin(\theta_c)} \right) \\ i_{Bu} = i_{Ed} &= \frac{|Bu, Bd|}{2} \left(\frac{\cos(\theta_{Bz})}{\cos(\theta_c)} + \frac{\sin(\theta_{Bz})}{\sin(\theta_c)} \right) \\ i_{Bd} = i_{Eu} &= \frac{|Bu, Bd|}{2} \left(\frac{\cos(\theta_{Bz})}{\cos(\theta_c)} - \frac{\sin(\theta_{Bz})}{\sin(\theta_c)} \right) \\ i_{Fu} = i_{Cd} &= \frac{|Fu, Fd|}{2} \left(\frac{\cos(\theta_{Fz})}{\cos(\theta_c)} + \frac{\sin(\theta_{Fz})}{\sin(\theta_c)} \right) \\ i_{Fd} = i_{Cu} &= \frac{|Fu, Fd|}{2} \left(\frac{\cos(\theta_{Fz})}{\cos(\theta_c)} - \frac{\sin(\theta_{Fz})}{\sin(\theta_c)} \right) \end{aligned} \quad (13)$$

3. 결 론

4극 스피리컬 영구자석형 전동기의 회전자계 발생을 위한 12코일의 회전자계 식을 제안하였다. 기존에 회전자계 식은 삼각함수를 이용하여 위아래 코일의 전류를 배분하는 것으로 해당 식에서 각주파수는 일정하지만 회전축의 위치가 수직이 아닐 경우 회전자의 회전시에 위치오차가 발생하여 일정한 주파수로 회전할 수 없는 문제가 발생하였다. 이를 보완하기 위하여 회전자가 일정한 주파수로 회전할 경우 나타나는 기자력의 X-Y 평면상의 방향을 Z-Y-Z Euler 각을 이용하여 먼저 구하였다. 그리고 기자력이 특정 코일쌍 내부를 지날 때 지나가는 위치각 방향으로 합성 기자력이 발생하도록 위쪽과 아래쪽의 코일의 전류를 결정하였다. 다만 이를 연산하기 위해서는 회전자계식은 간단하게 나타낼 수 없었으며 매번 Euler 변환과 전류크기를 계산하는 연산을 수행해야 하는 문제점이 있다.

감사의 글

이 논문은 2010년도 정부(교육과학기술부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 연구임(No. 2008-0060145)

[참 고 문 헌]

- [1] Sung-Hong Won, "A Study on the Analysis and the Control characteristics of a 3 D.O.F Spherical Motor for Robotic joints," Ph D thesis, Hanyang University, Seoul, Korea, Feb, 2007
- [2] Wang, J.; Mitchell, K.; Jewell, G.W.; Howe, D.; "Multi-degree-of-freedom spherical permanent magnet motors," ICRA 2001, Vol.2, 2001, pp 1798-1805
- [3] Kaneko, K, Yamada, I., and Ita, K., "Spherical DC servo Motor with Three Degrees of Freedom," ASME Trans. Journal of dynamic Systems, measurement and Control, Vol. 111, Number 3, sep. 1989, pp.398-402
- [4] John J. Craig, "Introduction to Robotics," Pearson prentice hall, 2005.
- [5] Sung-Chul Go, "A Study on Vector Control of 3-D.O.F. spherical PM motor," Ph D thesis, Hanyang University, Seoul, Korea, Aug, 2010