

터보 압축기용 초고속 영구자석형 동기전동기의 설계 및 특성 해석

장석명*, 고경진*, 유대준*, 박지훈*, 이운호*, 이성호**
 충남대학교*, 한국생산기술연구원**

Design and Characteristics Analysis of High-Speed Permanent Magnet Synchronous Motor for Turbo Compressor

Seok-Myeong Jang*, Kyoung-Jin Ko*, Dae-Joon You*, Ji-Hoon Park*, Un-Ho Lee*, Sung-Ho Lee**
 Chungnam National University*, Korea Institute of Industrial Technology**

Abstract - This paper deals with design and characteristics analysis of 7.5-kW, 60,000-rpm class permanent magnet synchronous motor for turbo compressor. In order to determine the design parameters of rotor, torque per rotor volume method is applied. And, to analyze the magnetic field distribution and estimate the electrical parameters such as back EMF constant, inductance and torque constant, electromagnetic transfer relations theorem is employed. We compare the characteristics analysis results of model designed by proposed method with those by nonlinear FEA. As a result of this, the design have been validated.

1. 서 론

초고속 회전기 시스템은 산업 현장이나, 특히 공작기계와 스피들 구동용, 또는 터보압축기나 마이크로 터빈과 같은 고용량 소형 시스템에 적용되는 사례가 늘어나고 있으며, 이에 따라 그에 대한 연구가 매우 활발히 진행되고 있다 [1]. 초고속 회전기는 기어가 필요 없이 직접 구동 드라이브나 가스터빈에 직접 접속되어 초고속 회전력을 얻을 수 있기 때문에, 시스템의 소형화, 비용절감, 고효율, 간단한 유지보수의 장점을 갖는다. 본 논문에서는 초고속 터보 압축기 시스템에 적용되는 7.5-kW, 60,000-rpm급의 정격출력 및 정격속도를 갖는 터보 압축기용 초고속 전동기로 영구자석형 동기전동기를 선정하고, 전자기 전달관계이론과 등가 자기회로법을 이용한 설계 기법을 제시하였다. 이에 따른 설계결과가 그 타당성을 입증하기 위하여 유한요소해석법에 의한 결과와 비교하였다.

2. 설계 사양

표 1은 본 연구에서 요구되는 설계 사양을 나타낸 것이다. 전동기의 정격 출력은 7.5-kW이고, 정격 속도는 60,000-rpm이며 3상 Full-Bridge 인버터의 정현파 구동을 선정하였다. 토크의 리플을 최소로 가져가고 주파수를 고려하여 영구자석의 자화는 하나의 쌍극을 갖는 직경방향의 자화로 결정하였다. 그림 1은 본 논문에서 설계될 전동기의 구조를 보여준다. 24개의 슬롯과 3상 분포권 권선을 갖는 고정자와 Inconel 슬리브와 Sm2CO3의 영구자석, 고정자과 같은 규소강판 재질의 축을 갖는 회전자로 구성된다.

3. 체적결정 및 자계 특성 해석

3.1 회전자 체적 결정

본 절에서는 식 (1)에 정의된 전동기의 초기 체적 결정을 위한 출력방정식으로부터 회전자의 체적을 결정하고 접선속도 등을 고려하여 회전자의 외반경과 축방향 길이를 결정하였다 [2].

$$T = KD_r^2 L_{stk} \tag{1}$$

여기서 T 는 토크, D_r 은 회전자 내반경, L_{stk} 는 회전자 축방향 길이를 나타낸다. 그리고 K 는 출력 상수로서 이는 기기의 설계 조건 및 설계자의 경험에 의해 결정되어 진다. 식 (1)을 회전자 체적당 토크(TRV)로 나타내면 식 (2)와 같다.

$$TRV = 4T / (\pi D_r^2 L_{stk}) \quad (kNm/m^2) \tag{2}$$

본 설계에서는 영구자석의 재질과 타입, 그리고 냉각조건등을 고려하여 TRV 값을 설정하였고 이로부터 회전자의 접선속도를 계산하여 회전자의 외경과 축방향 길이를 그림 1 (b)에서와 같이 결정하였다.

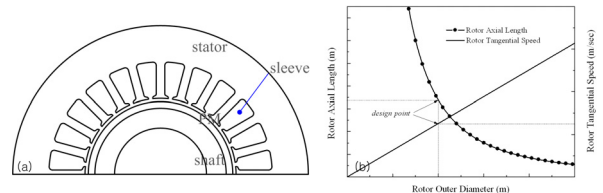
3.2 자계 특성 해석

그림 2 (a)는 영구자석형 동기기의 2-D 해석모델이다. 모델의 상부는 영구자석에 의한 자계특성, 하부는 고정자 권선에 의한 자계특성 해석을 위한 모델이다. 이 모델에서 자기벡터퍼텐셜 A 는 θ 방향으로 분포특성을 갖고 있으며, r 방향으로 시간 t 에 대하여 변화율을 갖는 함수로 식 (3)과 같다.

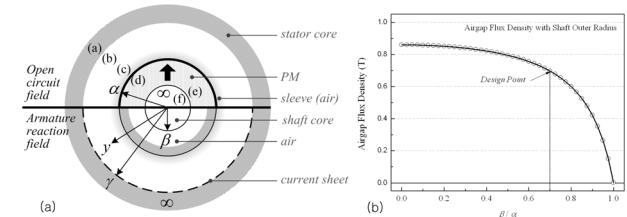
$$\vec{A} = Re.A(r,t)e^{-j(\theta+mt)}\vec{i}_z \tag{3}$$

<표 1 설계 사양>

사 양	값	사 양	값
정격출력	7.5 (kW)	정격속도	60,000 (rpm)
입력전압	380 (Vac)	상 수	3
극 수	2	구동방식	정현파 구동



<그림 1> (a) 영구자석형 동기전동기의 구조와 (b) TRV에 의한 회전자의 외경에 따른 축방향길이와 접선속도 특성곡선



<그림 2> (a) 영구자석형 동기기의 2-D 극좌표 해석 모델과 (b) 영구자석 두께에 따른 공극자속밀도 특성곡선 및 설계점

2.2.1 영구자석영역에서의 자계특성해석

그림 2 (a)의 영구자석영역에서의 해석모델에서는 전류원이 존재하지 않으므로 $\nabla \times H = 0$ 이 성립하고 자기벡터퍼텐셜 A 는 ' $\nabla \times A = B$ '로 정의된다. 이로부터 식 (4)의 지배방정식을 도출할 수 있다.

$$\nabla^2 \vec{A} = -\mu_0 (\nabla \times \vec{M}) \tag{4}$$

여기서 μ_0 는 진공에서의 투자율이며, 극좌표모델에서 자화 \vec{M} 을 정의하면 식 (5)와 같다.

$$\vec{M} = M_m e^{-j\theta} \vec{i}_r + M_{\theta n} e^{-j\theta} \vec{i}_\theta \tag{5}$$

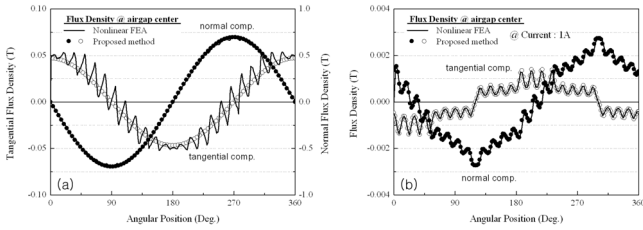
식 (4)의 일반해로부터 자기벡터퍼텐셜과 원주방향 자속밀도의 전달관계는 식 (6)과 같다 [3].

$$\begin{bmatrix} B_{\theta n}^d \\ B_{\theta n}^c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} F_0(\beta, \alpha) & G_0(\alpha, \beta) \\ G_0(\beta, \alpha) & F_0(\alpha, \beta) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} A_{zn}^d \\ A_{zn}^c \end{bmatrix} + \frac{j\mu_0 M_m}{2} \begin{bmatrix} \alpha \ln \alpha F_0(\beta, \alpha) + \beta \ln \beta G_0(\alpha, \beta) + \ln \alpha + 1 \\ \alpha \ln \alpha G_0(\beta, \alpha) + \beta \ln \beta F_0(\alpha, \beta) + \ln \beta + 1 \end{bmatrix} \tag{6}$$

이 전달관계에서 2극의 평행방향 자화배열을 갖는 영구자석의 영역에서는 M_n 의 값은 0이므로 영구자석의 소스에 대한 항은 고려하지 않고 다만 경계조건에서만 고려하면 된다. 식 (6)으로부터 공극영역에서의 전달관계행렬을 식 (7)과 같고 식 (8)의 경계조건으로부터 식 (9)의 자속밀도를 구할 수 있다.

$$\begin{bmatrix} B_{\theta n}^y \\ B_{\theta n}^x \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} F_0(\alpha, Y) & G_0(Y, \alpha) \\ G_0(\alpha, Y) & F_0(Y, \alpha) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} A_{zn}^y \\ A_{zn}^x \end{bmatrix} \tag{7}$$

$$B_{\theta n}^b = 0, \quad A_{zn}^c = A_{zn}^d, \quad B_{\theta n}^c = B_{\theta n}^d - \mu_0 M_{\theta n}, \quad B_{\theta n}^c = \mu_0 M_{\theta n} \tag{8}$$



〈그림 3〉 (a) 영구자석과 (b) 전기자 반작용에 의한 공극에서의 자속밀도 특성

$$B_m^y = -jA_{zn}^y / Y, \quad B_{\theta n}^y = -\partial A_{zn}^y / \partial r \quad (9)$$

그림 2 (b)는 전자기 전달관계법에 의해 계산된 축 반경에 따른 공극자속밀도의 변화 추이를 나타내며 요구되는 공극 자속밀도를 만족하는 축의 반경을 그림에서와 같이 결정하였으며 결정된 설계변수에서의 자속밀도 특성은 그림 3 (a)에서와 같이 유한요소해석 결과와 비교되어 그 타당성이 입증되고 있다.

2.2.2 전기자반작용에 의한 자계특성해석

그림 2 (a)의 전기자 반작용 필드에 의한 해석 모델에서 전류의 분포는 고정자 내표면에서의 얇은 면으로, 영구자석의 비투자율은 1로 가정하였다. 영구자석에 의한 공극에서의 전달관계와 마찬가지로 전기자 반작용에 의한 공극에서의 전달관계는 식 (10)과 같으며, 식 (11)의 경계조건으로부터 자속밀도 해를 얻을 수 있다 [3].

$$\begin{bmatrix} B_{\theta n, w}^c \\ B_{\theta n, w}^y \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} F_0(Y, \beta) & G_0(\beta, Y) \\ G_0(Y, \beta) & F_0(\beta, Y) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} A_{\theta n, w}^c \\ A_{\theta n, w}^y \end{bmatrix} \quad (10)$$

$$B_{\theta n, w}^b = \mu_0 J, \quad B_{\theta n, w}^c = 0 \quad (11)$$

그림 3 (b)는 전기자 반작용에 의한 공극자속밀도의 해석결과를 도시한 것이며 이 역시 유한요소해석결과와 비교되어 그 타당성이 입증된다.

4. 파라미터 산출

4.1 고정자 권선사양 결정

초기 설계시 고정자의 권선사양의 결정은 등가 자기회로법에 의해 결정된다. 요구되는 역기전력을 만족하는 권선사양은 정수배로 결정되므로 전자기전달관계법을 이용하여 설계변수를 변경해가며, 요구되는 설계치에 정확히 접근하도록 하였다. 역기전력의 최대값을 E_{max} 라 할 때 이는 식 (12)와 같이 표현되고, 이 때 요구되는 역기전력 값을 E_{ref} 라 하면 슬롯당 턴수는 식 (13)에 의해 결정된다 [4].

$$E_{max} = mk_w B_m^y L_{stk} \gamma N \omega \quad (12)$$

$$N_s = E_{ref} / (mk_w B_m^y L_{stk} \gamma N_{app} \omega) \quad (13)$$

여기서 m 은 극수, k_w 은 권선계수, L_{stk} 는 축방향 길이, N 은 상당턴수, γ 는 고정자 내반경, ω 는 회전각 각속도, N_{app} 는 매극 매상당 슬롯수이다.

4.2 역기전력 상수

역기전력은 공간에 따른 쇠교자속의 변화율과 회전속도 ω 의 곱으로 정의되는데 영구자석에 의한 공극에서의 자속밀도 B_m^y 와 공극면의 면적 S 에 의해 쇠교자속은 $d\phi = B_m^y \cdot S d\theta$ 로 표현되고, 1-코일피치에 대해 쇠교하는 자속 ϕ 는 식 (14)와 같다.

$$\phi = \frac{2}{\gamma} \gamma L_{stk} A_{zn}^y (e^{-j(\theta_i/2 - \alpha)} - e^{j\alpha}) \quad (14)$$

여기서, α 는 각각 1-코일피치를 나타낸다. 이로부터 역기전력은 식 (15)과 같고 역기전력 상수 K_E 는 식 (16)와 같다.

$$V_{emf} = -\frac{d\phi}{dt} = -j\omega N \phi \quad (15)$$

$$K_e = \max(V_{emf} / \omega) \quad (16)$$

4.3 인덕턴스

자기인덕턴스 L_{self} 는 $L_{self} = \phi_a / I_a$ 에 의해 구해지는데 여기서 ϕ_a 는 전기자반작용에 의한 자속이며, 이는 식 (17)로부터 얻어진다.

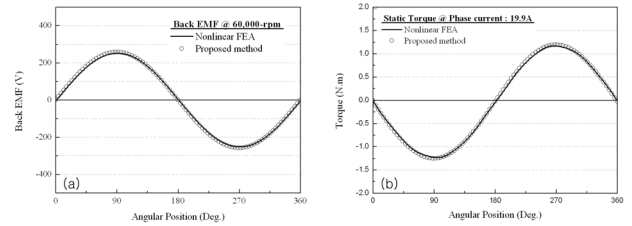
$$\phi_a = N \int B_{rn, w} \cdot \gamma \cdot L_{stk} d\theta \quad (17)$$

이 식으로부터 자기인덕턴스는 식 (18)으로 구해진다.

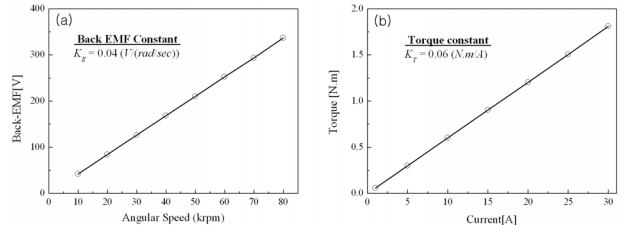
$$L_{self} = N^2 \gamma L_{stk} \mu_0 I_n / np (1 - \cos(np\pi/2)) \quad (18)$$

4.4 토크 상수

전자기 토크는 맥스웰 응력법에 의해 영구자석 회전자에 작용하는 힘을 계산함으로써 구해지며, 2차원 해석에서 응력 T_{ij} 는 Korteweg-Helmholtz 힘밀도와 관련하여 식 (19)로 표현된다.



〈그림 4〉 역기전력 특성과 정토크 특성



〈그림 5〉 속도에 따른 역기전력의 최대값과 전류에 따른 토크 특성

$$T_{ij} = \mu H_i H_j - \delta_{ij} \frac{\mu}{2} H_k H_k \quad (19)$$

힘이 작용하는 면적 S 에 대해 영구자석 영역에 작용하는 접선방향의 힘 F_θ 를 식 (20)에 의해 계산할 수 있으며, 토크 T_z 는 식 (21)에 의해 얻어진다.

$$F_\theta = -S < T_{r\theta}^d > = -S \mu_0 < H_m^c H_{\theta n}^c > \quad (20)$$

$$T_z = r \times F_\theta \quad (21)$$

여기서, 토크상수는 고정자 권선의 전류 I_k 로 토크를 나눔으로써 식 (22)과 같이 얻을 수 있다.

$$K_T = \max(T_z / I_k) \quad (22)$$

4.5 저항

한 상의 저항은 한 상의 권선길이 l_w 를 구함으로써 $R = \rho \cdot l_w / A$ 에 의해 구할 수 있는데, 여기서 ρ , A 는 각각 구리의 저항률, 한 턴의 면적이다. 그리고 l_w 는 식 (23)에 의해 구해지는데 여기서 $N_m, N_{coil}, O_h, A_h, \beta_{ex}$ 는 각각 코일수, 코일당 턴수, 오버행길이, angled section의 높이, 엔드턴길이를 나타낸다.

$$l_w = N_m N_{coil} (2L_{stk} + 4O_h + 4A_h + 2\beta_{ex}) \quad (23)$$

5. 설계 및 해석 결과

그림 4는 정격속도에서의 역기전력 특성과 정격전류에서의 정토크 특성을 나타낸다. 그리고 그림 5는 속도에 따른 역기전력의 최대값과 전류에 따른 토크 특성을 도시한 것이다. 이에 보여지는 바와같이 설계된 모델의 특성은 요구되는 설계사양을 만족하고 있으며 이는 유한요소해석 결과와 비교되어 그 타당성이 입증된다.

6. 결 론

본 논문에서는 전자기 전달관계법과 등가 자기회로법을 이용하여 초고속 터보 압축기 시스템에 적용되는 7.5-kW, 60,000-rpm급의 터보 압축기용 영구자석형 동기전동기의 설계 기법을 제시하였다. 이에 따른 설계결과를 유한요소해석법에 의한 결과와 비교하여 그 타당성을 입증하였다. 향후 회전자의 동적 거동을 해석함으로써 이를 고려하여 축의 재질 및 반경을 고려한 설계를 수행하고, 또한 고효율화를 위해 철손, 동손, 회전자손등을 고려한 초기 설계를 수행할 것이다.

[참 고 문 헌]

[1] Nicola Bianchi, Silverio Bolognani, Fabio Luise, "Potentials and limits of high-speed PM motors," IEEE Trans. Indust. Applicat., vol.40, Nov./Dec., 2004.
 [2] J.R. Hendershot Jr, TJE Miller, Design of Brushless Permanent Magnet Motors, Magna Physics Publishing and Clarendon Press-Oxford, 1994.
 [3] J. R. Melcher, Continuum Electromechanics, Cambridge, MA : MIT Press, 1981.
 [4] D.C.Hanselman, Brushless Permanent Magnet Motor Design, McGraw-Hill, Inc.