

600마력급 초고속 영구자석 동기 전동기의 설계 및 특성 해석

장석명, 김현규, 고경진, 최장영
충남대학교

Design and Characteristics Analysis of 600HP Class High-Speed Permanent Magnet Synchronous Motor

Seok-Myeong Jang, Hyun-Kyu Kim, Kyoung-Jin Ko, Jang-Young Choi
Chungnam National University

Abstract - This paper deals with design and characteristics analysis of 600HP class high speed permanent synchronous motor. The field equations due to magnet and stator windings are established in terms of vector potential and 2-d polar coordinate system. Back-emf and torque are then derived. The results compared with finite element method and show in good conformity with those obtained from finite element method.

1. 서 론

1990년대에 들어 네오디움(NeFeB)합금 계열과 같은 고밀도에 에너지를 갖는 희토류계 자석의 사용으로 영구자석 동기 전동기(Permanent Magnet Synchronous Motor)의 응용개발이 국내,외적으로 크게 확산되고 있다. 최근에 와서 네오디움(NeFeB)합금 계열과 같은 영구자석을 이용한 동기 전동기는 다양한 산업현장에 적용되어 한층 매력을 끌고 있다. 특히 초고속 영구자석 기기에 관한 연구는 영국의 Jason, Zhu, Howe가 발표한 150,000rpm, 1.25kW 용량의 초고속 영구자석 전동기의 회전자 공진에 관한 연구를 비롯하여 최근 수년 동안 활발한 연구가 이루어지고 있다.[1]-[4] 일본의 Takahashi 등은 희토류계의 영구자석과 섬유보강 플라스틱 재질의 슬리브를 갖는 표면 부착형 영구자석 전동기를 초고속 구동 및 응용에 적용한 결과를 발표한 바가 있다.[5]

본 논문에서는 447.6kW(600HP), 30000rpm급의 정격출력 및 정격속도를 갖는 영구자석 동기 전동기를 선정하고 전달관계이론과 등가자기 회로법의 설계 기법을 이용하였다. 또한 본문에 제시된 설계 결과는 유한요소해석법과 비교함으로써 설계의 타당성을 입증하였다.

표 1은 본 논문에서 요구되는 설계 요구 사양을 나타낸 것이다.

표 1. 영구자석 동기 전동기의 설계 요구 사양

사 양	값	사 양	값
정격출력	447.6 (kW)	정격속도	30,000 (rpm)
입력전압	440 (Vac)	상 수	3
극 수	2	구동 방식	정현파 구동

2. 초고속 영구자석 동기 전동기의 설계

2.1 설계 모델

그림 1은 영구자석 동기 전동기의 구조이고 24슬롯과 3상 분포권 권선을 갖는 고정자와 영구자석, 슬리브, 회전자로 구성된다. 해석 모델의 정격 출력은 447.6kW이고, 정격 속도는 30,000rpm이며 3상 Full Bridge 인버터의 정현파 구동을 요구 사양으로 갖는다.

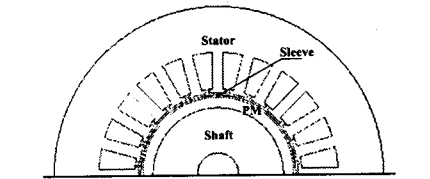


그림 1. 초고속 영구자석 동기전동기의 구조

2.2 회전자 체적 선정

본 논문에서의 회전자 체적 선정을 위한 방법으로 식 (1)의 회전자 체적당 토크(TRV : Torque per Rotor Volume) 방법을 사용하여 회전자의 외반경과 축 방향 길이를 결정하였다.

$$TRV = \frac{4T}{\pi D_r^2 L} \quad (1)$$

여기서, T 는 토크, D_r 은 회전자 직경, L 은 회전자 축 방향 길이를 나타낸다. 본 설계에서 TRV 값은 영구자석 및 냉각 조건을 고려하여 경험치로 값을 선정함으로써 회전자의 기본 체적인 회전자 직경과 축 방향을 그림 2에서와 같이 결정하였다.

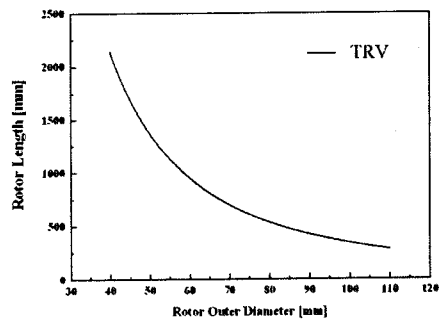


그림 2. TRV 값에 의한 회전자의 외경에 따른 축 방향길이

2.3 고정자 권선 사양 선정

고정자 권선 사양에 대한 초기 설계는 등가자기 회로법에 의해 결정된다. 요구되는 역기전력은 정수배로 결정되기 때문에 설계변수를 변경해 가며 설계 사양에 정확히 접근되도록 설계하였다. 역기전력 최대값 E_{max} 은 식(2)와 같이 표현될 수 있다.

$$E_{max} = pk_w l B L R_s N \omega \quad (2)$$

여기서, p 는 극수, $k_w l$ 은 권선계수, B 는 공극자속밀도, L

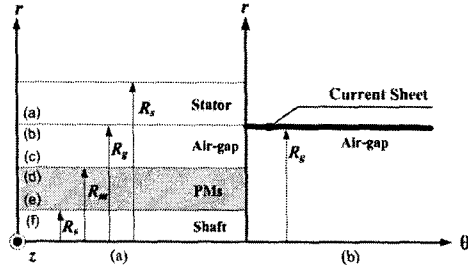


그림 3. 영구자석 동기 전동기에서 (a) 영구자석과 (b) 코일에서의 극좌표 해석 모델

은 고정자 축 방향 길이, R_s 는 고정자 내반경, ω 는 회전 각속도이다. 요구되는 역기전력을 E_{ref} 라 하면 슬롯당 권선 N_s 는 식(3)과 같이 계산될 수 있다.

$$N_s = \frac{E_{ref}}{pk_{w1}BLR_sNw} \quad (3)$$

식(3)에서 E_{ref} 를 만족하는 슬롯당 권선수 N_s 는 계산된 값보다 가까운 가장 큰 정수이다.

3. 특성 해석

3.1 영구자석 및 코일에 의한 자계 분포 해석

그림 3(a)는 자계 특성을 위한 영구자석 동기 전동기의 해석 모델이다. 해석 모델에서 자기벡터포텐셜 A 는 θ 방향의 성분을 갖고 있으며, r 과 t 성분에 대한 함수로 표현되며 식(4)로 나타낼 수 있다.

$$\vec{A} = \text{Re} A(r, t) e^{-j(\theta + mz)} \vec{i}_z \quad (4)$$

3.1.1 영구자석에서의 자계 특성 해석

맥스웰 방정식에 기초하여 그림 3의 영구자석에서는 전류원이 존재하지 않으므로 식(5)가 성립된다.

$$\nabla \times H = 0 \quad (5)$$

식(5)에 자기벡터포텐셜 A 의 정의인 $\nabla \times A = B$ 와 Coulomb Gauge법칙을 대입하면 영구자석에서의 자계분포 예측을 위한 지배방정식인 식(6)을 도출할 수 있다.

$$\nabla^2 \vec{A}_n = \frac{\partial^2}{\partial r^2} A_{zn} + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} A_{zn} - \left(\frac{np}{r}\right)^2 A_{zn} = -\frac{\mu_0 q}{r} M_n \quad (6)$$

여기서, μ_0 는 진공에서의 투자율이고, 극좌표모델에서 자화 M_n 를 정의하면 식(7)과 같이 표현될 수 있다.

$$\vec{M}_n = M_{rn} + \frac{M_{\theta n}}{q} \quad (7)$$

식(6)에서 자기벡터포텐셜 A 의 성분은 z 성분이고, 해석하는 식(8)로 주어진다.

$$A_{zn}^h = \sum_{n=odd}^{\infty} [A_n r^q + B_n r^{-q}] \quad (8.a)$$

$$A_{zn}^p = \begin{cases} \sum_{n=odd} \frac{j\mu_0 q M_n}{(q^2 - 1)} & q \neq 1 \\ -\frac{j\mu_0}{2} r \ln r M_n & q = 1 \end{cases} \quad (8.b)$$

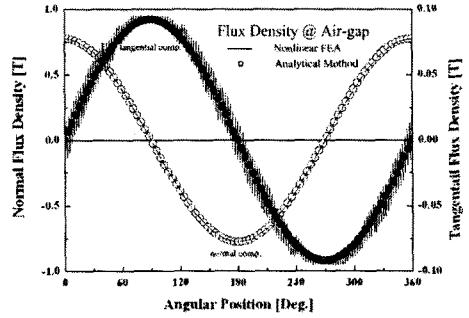


그림 4. 영구자석에 의한 공극에서의 자속밀도

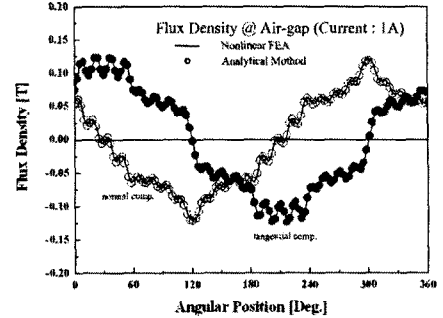


그림 5. 코일에 의한 공극에서의 자속밀도

여기서 위 첨자 h 와 p 는 각각 일반해와 특수해를 나타낸다. 식(8.b)에서 극수가 4극 이상일 경우는 $q \neq 1$ 일 때이고 2극일 경우는 $q = 1$ 일 때 성립된다. 식(8)의 자기벡터포텐셜 A 와 자기벡터포텐셜의 정의인 $\nabla \times A = B$ 로부터 반경방향 및 원주 방향 자속밀도를 식(9)로 구할 수 있다.

$$B_{rn} = -\frac{q}{r} [A_n r^q + B_n r^{-q}] - \frac{j\mu_0}{2} r \ln r M_n \quad (9)$$

$$B_{\theta n} = -q [A_n r^{q-1} + B_n r^{-(q+1)}] - \frac{j\mu_0}{2} r \ln r M_n$$

위의 반경방향 및 원주 방향 자속밀도에 대한 미정계수는 경계조건을 대입함으로써 구할 수 있다. 그림 4는 영구자석에 의한 자속밀도를 유한요소해석 결과와 비교하였다.

3.1.2 전기자 반작용에 의한 자계 특성 해석

그림 3(b)에서 해석 모델에서 전류의 분포는 고정자 내표면에서의 얇은 면으로, 영구자석의 비투자율은 1로 가정하였다. 영구자석에서의 자계 특성 해석과 마찬가지로 자기벡터포텐셜 A 의 정의인 $\nabla \times A = B$ 와 Coulomb Gauge법칙을 대입하면 전기자 반작용에 의한 자계 분포 예측의 지배방정식을 식(10)로 도출할 수 있다.

$$\frac{\partial^2}{\partial r^2} A_{zn} + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} A_{zn} - \left(\frac{np}{r}\right)^2 A_{zn} = 0 \quad (10)$$

지배방정식에서 구한 자기벡터포텐셜 A 를 자기벡터포텐셜 A 의 정의인 $\nabla \times A = B$ 에 대입하면 반경 방향 및 원주 방향의 자속 밀도를 식(11)으로 구할 수 있다.

$$B_{rn} = -\frac{q}{r}[A_n r^q + B_n r^{-q}] \quad (11)$$

$$B_{\theta n} = -q[A_n r^{q-1} + B_n r^{-(q+1)}]$$

자속밀도를 구하기 위한 경계조건은 식(12)과 같이 주어진다.

$$r \rightarrow 0 \quad A_{zn} = 0 \quad (12)$$

$$r = r_g \quad B_{\theta n} = -\mu_0 J$$

그림 5는 코일에 의한 자속밀도를 유한요소해석 결과와 비교하였다.

3.2 역기전력 특성

역기전력은 위상각에 따른 쇄교자속의 변화량과 회전각속도의 곱으로 나타낼 수 있다. 쇄교자속은 공극에서의 자속밀도와 공극면의 면적에 의해 식(13)과 같이 표현될 수 있다.

$$d\phi = B \cdot S d\theta \quad (13)$$

코일 1퍼치에 쇄교하는 자속 ϕ 는 식(14)과 같이 표현될 수 있다.

$$\phi = \frac{2}{Y} R_s L A_{zn} (e^{-jnp(\frac{\theta}{2} - \omega t)} - e^{-jnp(\omega t)}) \quad (14)$$

여기서, θ_s 는 코일 1퍼치를 나타내고 역기전력은 식(15)과 같이 표현된다.

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

3.3 토크 특성

전자기 토크 T 는 맥스웰 용력법에 의해 구해지며, [6]에 의해 고안된 용력 T_{ij} 는 Korteweg-Helmholtz 힘밀도와 관련되어 있고 식(16)과 같이 표현될 수 있다.

$$T_{ij} = \mu H_i H_j - \delta_{ij} \frac{\mu}{2} H_k H_k \quad (16)$$

여기서 Kronecker delta δ_{ij} 는 $i=j$ 때는 1이고 $i \neq j$ 때는 0이다. 힘이 작용하는 면적 S 에 대하여 영구자석 영역에 작용하는 접선방향의 힘 F_θ 을 식(17)에 의해 계산할 수 있으며 토크 T_z 는 식(18)에 의해 얻을 수 있다.

$$F_\theta = -S < T_{r\theta}^d \geq -S \mu_0 < H_{rn}^c H_{\theta n}^c > \quad (17)$$

$$T_z = r \times F_\theta \quad (18)$$

4. 해석 결과

그림 6와 그림 7는 정격속도에서의 역기전력 특성과 정격전류에서의 토크 특성을 나타낸다. 그림에서 보여지는 바와 같이 설계된 모델의 특성은 요구 설계사양을 만족하고 있으며 이는 역기전력 및 토크에 대한 해석결과와 유한요소해석 결과와의 비교를 보여준다. 모든 해석결과와 유한요소해석결과가 매우 일치함을 볼 수 있다.

5. 결론

본 논문은 600마력급 초고속 영구자석 동기 전동기의 설계 및 특성해석을 수행하였다. 영구자석 동기 전동기의 회전자는 표면 부착형의 영구자석 형태를 가지며, 고정자는 분포권을 행하여 설계 및 해석을 하였다. 또한, 등가자기 회로법 및 TRV를 이용하여 설계 방법을 제시하였고, 2차원 극좌표계와 공간고조파법을 이용하여 반

경 방향 및 원주 방향의 자계특성식을 도출하였다. 도출된 식을 통해 해석 모델의 토크 및 역기전력 특성식을 얻어 해석 결과를 도출하였다. 해석 결과는 유한요소법과 비교하여 잘 부합함을 확인하였으며, 해석법의 타당성을 검증하였다. 향후 시스템과 결합된 구동 특성 및 제약을 통한 연구가 지속되어야 할 것으로 사료된다.

표 2. 해석 모델의 사양

사양	치수
고정자 외반경 (mm)	120
고정자 내반경 (mm)	58
회전자 외반경 (mm)	55
유효 스택 길이 (mm)	279
슬롯 수	24
슬롯당 턴수	1
상당 턴수	4

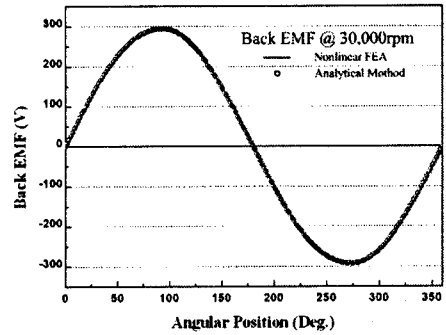


그림 6. 역기전력 특성

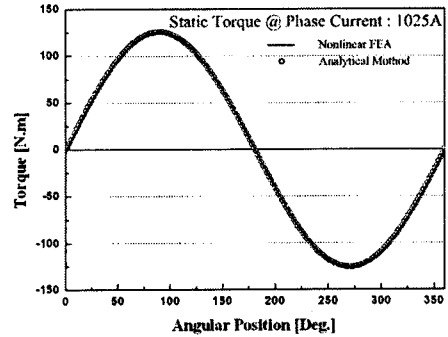


그림 7. 정토크 특성

[참고 문헌]

- [1] N.Taghizadeh Irenji, "Calculation of electromagnetic rotor losses in high-speed permanent magnet machines", PhD. dissertation, Univ. of Southampton, UK, 1998.
- [2] 이성호, 자기회로 구성조건에 따른 직선형 전자기 에너지 변환기의 정특성 해석, 박사학위논문, 충남대학교, 2003.
- [3] Z.Q.Zhu, D.Howe, "Influence of design parameters on cogging torque in permanent magnet machine," IEEE Trans. Energy Conv., vol.15, pp. 407-412, 2000.
- [4] K. Atallah, D. Howe, P.H. Melloor and D.A. stone, "Rotor Loss in Permanent Magnet Brushless Ac Machines" IEEE Trans. Ind. Applicat., Vol.31, pp. 60-62, 1999.
- [5] I.Takahashi, T.Koganezawa, F.Luise, "A super high speed PM motor drive system by a quasi-current source inverter", IEEE Trans. Indust. Applicat., vol30, no.3, pp.683-690, May/June 1994.
- [6] H. H. Woodson, J. R. Melcher, Electromechanical Dynamics, New York, Wiley, 1968.