

고속 영구자석형 동기전동기 설계 I : 정특성, 회로파라미터 기계적 특성 고찰

장석영*, 조한욱*, 최장영*, 고경진*, 최상규**
충남대학교 전기공학과*, 한국기계연구원**

Design of High-Speed PM Synchronous Motor I : Static Characteristics, Parameters, Mechanical Characteristics

Seok-Myeong Jang*, Han-Wook Cho*, Jang-Young Choi*, Kyoung-Jin Ko*, Sang-Kyu Choi**
Dept. of Electrical Engineering, Chungnam National University*, KIMM**

Abstract - This paper describes the electrical and mechanical design scheme, static characteristics analysis, electrical parameters and mechanical characteristics of 1kW, 28000 class PM synchronous motor for high-speed applications.

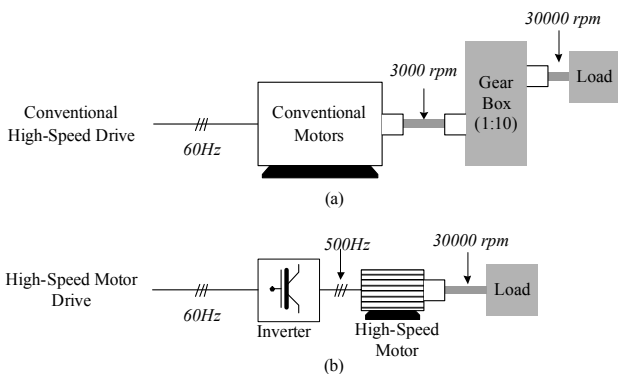
1. 서 론

근대산업이 발전하면서 각종 전동기는 고효율화, 대용량화, 소형·경량화, 신뢰성 향상 등의 목표로 현저히 진보하였다. 특히, 최근에는 지구 온난화, 기상이변, 오존층 파괴 등 환경문제와, 석유 에너지 자원의 고갈 위기에 따라 신재생 에너지, 친환경 차량, 고효율 전기기기 등의 지속 가능한 개발을 위한 노력이 계속되고 있다. 특히, 고속 전기기기는 소음과 고장의 원인이 되는 증속기어를 사용하지 않고 각종 시스템을 직접 구동할 수 있어 시스템 효율을 증대시킬수 있는 방안 중 하나이다. 표면 부착형 영구자석형 전동기의 경우 최근 잔류자속밀도가 1.0 T를 넘는 희토류계 영구자석의 발달과 더불어 고속, 고효율 전동기의 개발에 많이 응용되고 있으며, 기계적 안정성과 출력밀도 측면에서 가장 우수한 전동기로 평가된다 [1][2]. 본 논문에서는 고속운전을 위한 전기기기로 표면 부착형 영구자석형 동기전동기를 선정하고, 1kW 28000rpm 급 전동기의 전반적인 운전조건을 고려한 설계 및 전자계 정특성해석, 파라미터 도출 및 기계계 해석에 관한 내용을 다룬다.

2. 고속 응용을 위한 영구자석형 동기전동기의 설계

2.1 고속 응용 전기기계 시스템

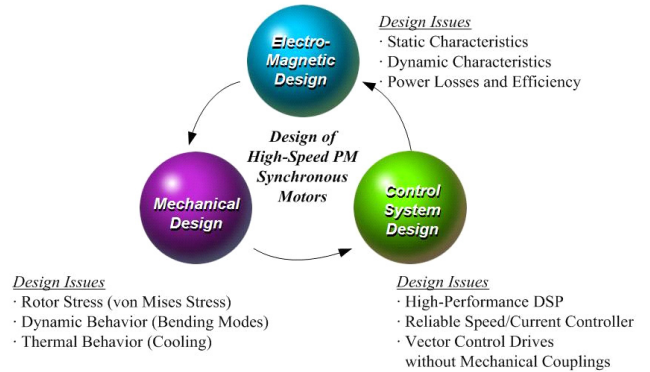
그림 1은 종래의 증속기어를 적용한 고속 회전기 시스템과 고속 전동기를 적용한 시스템을 각각 나타낸다. 현재 국내에도 그림 1(a)와 같이 종래의 방식을 적용한 고속회전 시스템을 보유하고 있지만 이를 그림 1(b)와 같이 고속 전동기로 대체 하였을 경우 시스템의 효율이 약 10% 이상 상승하게 되고 전체 시스템의 소음도 대폭 감소되며 부피가 약 1/10으로 줄어들어 소형-경량화, 유지보수 비용의 절감 등 많은 장점을 지닐 수 있게 되어 현재 선진국에서는 많은 연구 투자를 하고 있는 연구 분야 중의 하나이다.



<그림 1> 고속 응용 시스템 (a)종래의 기어식 (b)고속 전동기 적용식

2.2 고속 영구자석형 동기전동기 설계시 고려사항

그림 2는 고속 영구자석형 동기전동기의 설계를 위한 핵심요소기술을 나타낸다. 그림에서 보여지는 바와 같이 고속 영구자석형 동기전동기 설계 기술은 전자기 회로의 최적설계, 정특성 및 동특성 해석, 손실 해석 기술, 고속 회전축의 구조 및 진동설계, 베어링 및 윤활, 열해석 및 냉각 설계, 고주파 스위칭의 전력변환 기술, 제어기술 등의 다양한 기술이 집약된 연구분야이다.



<그림 2> 고속 영구자석형 동기전동기 설계시 고려사항

3. 정특성 및 회로파라미터 해석

3.1 설계 사양

설계 요구사항과 설계 조건은 다음과 같다.

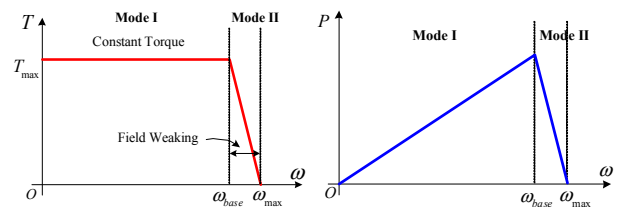
- 설계 요구 사양:
 - 정격토크 0.35 Nm @28000 rpm (출력 1kW)
 - 기타 설계 조건:
 - 고정자 외경 ≤65mm, 적층길이 ≤50mm
 - 영구자석 : Sm2Co17
 - 고정자 요크자속밀도 ≤1.2T, 치자속밀도 ≤1.5T
 - 인버터 : Vdc=297V, DSP-based SVPWM

3.2 역기전력 상수 및 속도한계

역기전력은 전동기의 성능파악에 있어서 가장 중요한 파라미터중 하나이며, 특히, 역기전력을 생성하는 영구자석에 의한 쇄교자속은 고속 영구자석형 동기전동기의 속도 한계를 결정하므로, 이에 대한 예측 및 산정은 매우 중요하다.

그림 3은 표면부착형 고속 영구자석 동기전동기의 벡터제어에 의한 동적특성을 나타내며 약계자운전영역 (Mode II)를 고려하지 않을 때 ω_{base} 는 전동기의 기저속도가 되며 ω_{base} 는 식(1)과 같다.

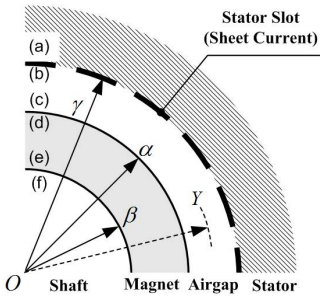
$$\omega_{base} = \frac{V_{s,max}}{\sqrt{\lambda_f^2 + (L_s I_q)^2}} \quad (1)$$



<그림 3> 벡터제어에 의한 토크, 출력 vs. 속도 특성

3.2 자속밀도, 역기전력 및 토크

그림 4는 4극의 평행방향 자화된 영구자석을 갖는 회전자와 3상의 고정자 권선을 갖는 슬롯리스형 영구자석 전기기기의 해석 모델이다. 전자기 전달관계에 의하여 해석모델의 전자계 현상을 해석적으로 구하기 위하여, 본 논문에서는 고정자 코어 및 축의 비투자율을 무한대라 가정하였다. 알파벳 문자 (a)~(h)는 각 영역의 경계를 나타내고, 그리스 문자 $\alpha \sim \delta$ 는 영구자석과 코일 영역의 내·외반경을 각각 나타낸다. 표 1은 해석모델의 각각의 설계 파라미터를 나타낸다.



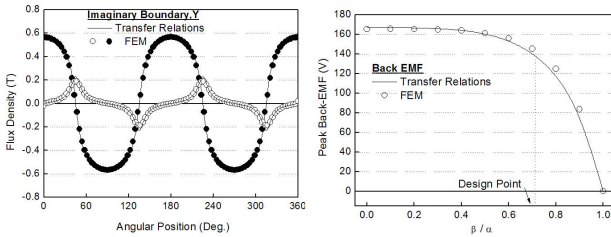
<표 1> 해석모델의 제한

Design specifications	Value
PM outer radius (α)	14.5 mm
Shaft radius (β)	11 mm
Stator inner radius (γ)	17.3 mm
Airgap center (ν)	15.9 mm
Pole number	4
Slot number	24
Magnetization pattern	parallel
Turns/phase/pole (N_{sp})	28 turns
Stack length (L_{st})	48 mm

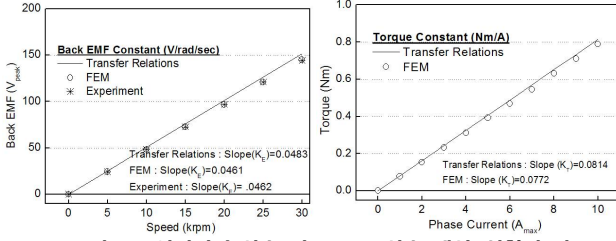
<그림 4> 해석모델

해석 모델에서 Maxwell 방정식을 적용하고, Coulomb's guage와 Vector Identity를 적용하면 해석모델의 지배방정식은 식(2)와 같이 나타낼 수 있다.

$$\nabla^2 \mathbf{A} = -\mu_0 \nabla \times \mathbf{M} \quad (2)$$



<그림 5> 영구자석 및 고정자 전류에 의한 공극 자속밀도



<그림 6> 역기전력 상수 및 토크 상수 해석-실험의 비교

$B = \nabla \times A$ 에 의하여 영구자석 내부에서의 r -방향 및 θ -방향의 자속밀도를 구하여 Geometry parameter F_0 와 G_0 를 적용하면 각각 식(2)와 같다.

$$\begin{bmatrix} B_{\theta n}^d \\ B_{\theta n}^e \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} F_0(\beta, \alpha) & G_0(\alpha, \beta) \\ G_0(\beta, \alpha) & F_0(\alpha, \beta) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} A_{zn}^d \\ A_{zn}^e \end{bmatrix}$$

$$-\frac{j\mu_0 np \left(\frac{M_{\theta n}}{jnp} + M_{rn} \right)}{(np)^2 - 1} \begin{bmatrix} \alpha F_0(\beta, \alpha) + \beta G_0(\alpha, \beta) + 1 \\ \alpha G_0(\beta, \alpha) + \beta F_0(\alpha, \beta) + 1 \end{bmatrix} \quad (3)$$

그림 5(a)는 영구자석 및 고정자 전류에 의한 자기적 공극 중앙에서의 자속밀도 분포를 각각 나타낸다. 역기전력은 영구자석에 의한 쇄교자속을 통해 구할 수 있으며, 1-슬롯 피치에 대한 쇄교자속을 Φ_{st} 라 할 때 식(4)와 같이 표현될 수 있다.

$$V_{emf} = -\frac{d\lambda_f}{dt} = -jnp\omega N_{sp} N_{tp} \Phi_{st} \quad (4)$$

그림 5(b)는 계산된 역기전력 및 영구자석 두께에 대한 설계점을 나타낸다. 토크는 Maxwell Stress Tensor에 의해 얻어지며, Stress Tensor T_{ij} 는 Korteweg-Helmholtz 힘밀도에 의하여 식(5)와 같다 [3].

$$T_{ij} = \mu H_i H_j - \delta_{ij} \frac{\mu}{2} H_k H_k \quad (5)$$

그림 6은 역기전력 상수 및 토크 상수에 대한 해석 및 실험결과를 나타내며, 0-20000 rpm 의 실험을 통해 본 논문의 해석 및 설계가 매우 타당함을 알 수 있다.

3.3 파라미터 해석

전동기의 저항은 표피효과 및 외부자계에 의한 와전류 효과가 거의 없으므로 dc 성분이 주저항 성분이며 식(5)와 같다. 인덕턴스는 고정자 전류에 의한 자계해석에 의하여 식(6)에 의해 얻어진다.

$$R_{ph} = \rho_c \frac{L_{winding}}{A_c} \quad (6)$$

$$L_{self} = N_{ph} \frac{2\gamma K_c L_{stk} \mu_0 I_n}{np} \left(1 - \cos \frac{n\pi}{2} \right) \quad (7)$$

<표 2> 설계된 전동기의 전기적 제한

Variable	Analytical	FEM	Measured
Phase Resistance (Ω)	0.287	0.245	0.244
Phase Sync. Inductance (mH)	0.434	0.420	0.457
Back EMF Constant (V/rad/sec)	0.0483	0.0461	0.0462
Torque Constant (Nm/A)	0.0814	0.0772	-
Base Speed (rpm)	29331	30732	30630
Airgap Flux Density (T_{max})	0.576	0.567	-
Teeth Flux Density (T_{max})	1.5	1.43	-
Yoke Flux Density (T_{max})	1.2	1.02	-

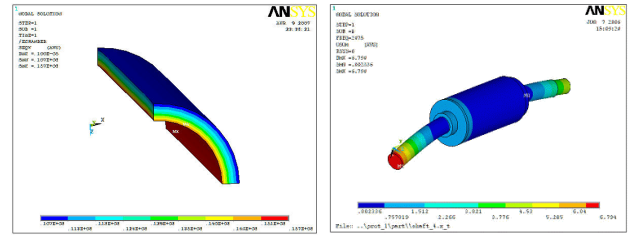
4. 기계적 특성 고찰

4.1 영구자석의 Stress

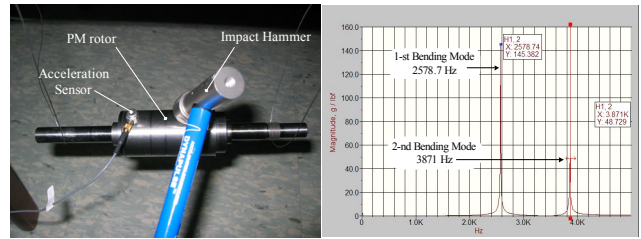
고속 회전기에서 높은 회전속도에 의한 영구자석을 포함한 회전자 조립체의 스트레스는 일반 중저속 기기에 비해 매우 심각한 문제이다. 특히 표면부착형 영구자석 전동기에서 영구자석의 열박음, 본딩 등의 기계적 결합이 스트레스에 의한 비산 및 변위에 의해 변형을 초래하므로 이에 대한 정밀한 예측이 요구된다. 그림 6(a)는 영구자석의 Stress 해석 결과이다. Max.Stress 15.7Mpa 가 영구자석 안쪽표면에서 발생하고 변위가 약 1um 가량 발생하므로, 두께 2mm 의 Inconel718 슬리브를 회전자 최외곽에 열박음 적용하였다.

4.2 Free-Free Natural Frequency

고속 회전시 회전자 조립체는 자체의 기계적 구조에 따른 공진주파수를 만나게 된다. 이는 회전자 진동은 물론 시스템의 고장을 초래할 수 있으므로, 설계시 이를 피하도록 하거나, 운전시 빠르게 공진점을 통과해야 한다. 그림 7(b)는 설계된 전동기의 1-st bending mode 이다. 약 2474 Hz에서 FFNF 가 나타나며, 이는 설계 요구사항에 대하여 매우 안정적이다. 그림 8은 FFNF 실험장치 및 FFT 스펙트럼을 나타낸다.



<그림 7> 영구자석 스트레스 및 FFNF 해석



<그림 8> FFNF 시험 장치 및 FFT 스펙트럼

4. 결론

본 논문에서는 고속 영구자석형 동기전동기의 벡터제어 인버터에 의한 운전조건을 고려한 설계, 전달관계 해석에 의한 정특성 해석 및 기계적 특성을 고려한 설계 전략을 제시하였으며, 유한요소해석 및 실험에 의한 설계법의 타당성 및 고속 운전시 안정성 평가에 대한 연구결과도 함께 제시하였다.

[참고 문헌]

[1] B.H.Bae, S.K.Sul, J.H.Kwon, and J.S.Byeon, "Implementation of sensorless vector control for super-high-speed PMSM of turbo-compressor," IEEE Trans. Indust. Applicat., vol.39, pp811-818, May/June 2003.
 [2] N.Bianchi, S.Bolognani, and F.Luise, "Potentials and limits of high-speed motors," IEEE Trans. Indust. Applicat., vol.40, pp.1570-1578, Nov./Dec. 2004.
 [3] J. R. Melcher, Continuum Electromechanics, Cambridge, MA : MIT Press, 1981.