2004년도 대한전기학회 하계학술대회 논문집 2004.7.14-16

슬롯팅을 고려한 직경방향 착자된 영구자석을 갖는 초고속 기기의 특성해석

장 석명, 최 장영, 양 현섭*, 조 한욱
충남대학교, 삼성 테크윈*

Analysis on the High Speed Machine with Diametrically Magnetized Permanent Magnet Rotor considering Slotting Effect

Seok Myeong Jang, Jang Young Choi, Hyun Sup Yang*, Han Wook Cho
Chungnam National University, Samsung Techwin*

Abstract - This paper deals with analysis of a 3-phase high speed machine with diametrically magnetized rotor. The field equations due to magnet and stator windings are established in terms of vector potential and 2-d polar coordinate systems and then, characteristic equation of torque and back emf are derived by using field equations. Finally, this paper predicts open-circuit field, armature reaction field distributions, field distributions on load, torque and back emf distributions from those of equations. Results are compared with predictions from correspond-ing finite element analyses.

1. 서 론

전동기의 회전속도를 높이면 동일 사이즈라도 출력을 크게 증대시킬 수 있으므로 시스템의 컴팩트화를 위해서는 구동용 모터의 초고속화가 필수적이다. 즉, 고속 모터나 발전기의 경우 증속기어가 없어도 고속 펌프나 콤프레서를 구동시킬 수 있으며 가스 터빈 등의 고속원동기에 발전기를 직접 연결할 수 있다. 따라서 초고속전동기는 경량, 소형 및 효율 측면에서 다른 기기들에 비해 우수하므로 능동제어 및 구동시스템에 많이 응용 되어지고 있다 [1].

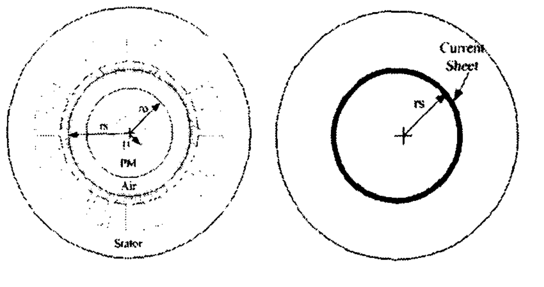
그러나 초고속 기기는 동일 출력의 범용 모터에 비해 소형화되기 때문에 기기에서 발생하는 열을 최소화하고, 회전자가 원심력에 충분히 견디도록 구조가 간단하며 견고해야할 뿐만 아니라, 초고주파 입력전원에 의한 고정자 철손, 회전자 와전류 손실을 최소화해야 하는 것이 필수적이다 [2].

본 논문에서는 3상 24슬롯인 고정자와 직경방향 착자된 회전자를 갖는 초고속 전동기의 슬롯팅을 고려한 무부하 시 자계분포, 전기자 권선에 의한 자계분포, 부하시 자계분포, 토크 및 역기전력 특성을 해석하고자 한다. 해석방법은 자기 벡터 자위와 2차원적인 극 좌표계를 이용한 공간 고조파법을 사용하고, 해석결과는 유한요소 해석결과와 비교하여 해석결과의 타당성을 입증하고자 한다.

2. 직경방향 착자된 영구자석을 갖는 초고속 기기

2.1 구조 및 해석 모델

그림 1 (a)는 직경방향 착자된 공심형 회전자를 갖는 2극/3상/24슬롯 초고속전동기의 구조를 보여준다. 그림 1(b)는 전기자 코일에 의한 자계분포를 해석하기 위한 단순화된 모델을 보여주며, 영구자석의 투자율은 공기와 같고 전류원은 r=rs에 면전류 밀도로 분포 한다고 가정하면, 해석영역은 공극영역만 남게 된다.



(a) (b)

그림 1. 직경방향 착자된 공심형 회전자를 갖는 2pole/ 3phase/ 24 slots 초고속전동기 : (a) 구조 및 (b) 고정자 권선에 의한 자계 해석 모델

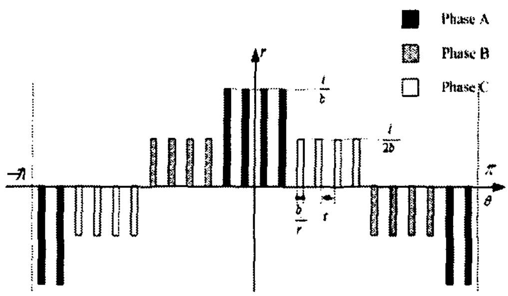


그림 2. 고정자 권선의 면 전류밀도 분포

2.2 특성해석

(1) 영구자석에 의한 자계특성식

맥스웰 방정식 $\nabla \times H = J$와 자기벡터 퍼텐셜의 정의 $\nabla \times A = B$를 이용, Coulomb gauge $\nabla \cdot A = 0$를 적용하면 식 (1)과 같은 지배방정식이 유도된다.

$$\frac{d^2}{dr^2}A_{zn}+\frac{1}{r}\frac{dA_{zn}}{dr}-\frac{q^2}{r^2}A_{zn}=-\mu_0\frac{q}{r}M_n \quad (1)$$

여기서 μ_0은 진공의 투자율이고, A_{zn}은 자기 벡터퍼텐셜 A의 z성분이며, 직경방향 착자된 초고속 기기의 기하학적인 구조에 의해 자기 벡터 퍼텐셜은 A_{zn}만 존재한다. 벡터 퍼텐셜의 정의 $\nabla \times A = B$에 식(1)에서 구해진 A_{zn}을 대입하면, 공기영역과 자석영역의 r방향 및 θ방향 자속밀도 특성식을 [3]에 제시된 것처럼 얻을 수 있으며, 여기에 경계조건을 대입하여 완성된 자속밀도 특성식을 얻을 수 있다.

(2) 전기자권선에 의한 자계특성식

그림 2는 고정자 권선의 전류밀도 분포를 보여준다. 여기서 b_o는 슬롯 개구폭으로 슬롯개구폭이 차지하는 각은 b_o/r_s rad 이며, t_o는 치 폭이 차지하는 전기적 각도이다. 한편, 그림 2에서 A상에 대해 푸리에 전개를 하면 A상에 의한 전류밀도 분포는 식 (2)로 주어진다.

$$J_a = \sum_{n=1,\,odd}^{\infty} I_n i_a \cos(q\theta) \tag{2.a}$$

$$I_n = \frac{16}{\pi b_0 q} \sin q([\,\delta - t_o]/2)\cos(q\delta)\cos(q\delta/2) \tag{2.b}$$

여기서 i_o는 A상 전류의 최대 값이고 $q=np$로 n은 고조파차수와 p는 극쌍수로 주어지며 $\delta = t_o + b_o/r_s$로 슬롯피치를 나타낸다. 3상 권선의 경우 각 상은 $2\pi/3$의 위상차가 나므로 B상과 C상의 전류 분포는 식 (3)으로 주어진다.

$$J_b = \sum_{n=1,\,odd}^{\infty} I_n i_b \cos q(\theta - 2\pi/3) \tag{3.a}$$

$$J_c = \sum_{n=1,\,odd}^{\infty} I_n i_c \cos q(\theta - 4\pi/3) \tag{3.b}$$

코일에 의한 자계를 구하기 위한 지배방정식은 식 (4)로 표현된다.

$$\frac{\partial^2}{\partial r^2} A_{zn} + \frac{1}{r}\frac{\partial}{\partial r} A_{zn} - \frac{q^2}{r^2} A_{zn} = 0 \tag{4}$$

A상에 의한 자속밀도를 구하기 위한 경계조건은 식 (5)로 주어진다.

$$r \to 0 \quad A_{zn} = 0 \tag{5.a}$$

$$r = r_s \quad B_{\theta n} = -\mu_0 J_a \tag{5.b}$$

식 (4)의 해와 자기벡터자위의 정의로부터 유도되어진 자속밀도 특성식에 경계조건 식 (5)를 대입하면 식 (6)으로 주어지는 A상에 의한 반경방향 자속밀도 얻는다.

$$B_{ra} = -\sum_{n=1,\,odd}^{\infty} \mu_0 i_a I_n r_s^{-(q-1)} r^{(q-1)} \sin(q\theta) \tag{6}$$

B상 및 C상에 의한 자속밀도 역시 A상에 의한 자속밀도 유도과정과 동일한 방식을 적용하여 구할 수 있지만, 식 (3)에서 알 수 있듯이 전류원이 $2\pi/3$의 위상차를 가지므로 자속밀도 역시 똑같은 위상차를 갖을 것임을 예측 할 수 있다. 결과적으로 3상전원에 의한 자속밀도는 각 상의 자속밀도를 중첩함으로써 식 (7)로 표현할 수 있다.

$$\begin{aligned} B_c &= B_{ra} + B_{rb} + B_{rc} \\ &= -\sum_{n=1,\,odd}^{\infty} \mu_0 I_n r_s^{-(q-1)} r^{(q-1)} \\ &\quad \cdot [\,i_a \sin(q\theta) + i_b \sin q(\theta - 2\pi/3) + i_c \sin q(\theta - 4\pi/3)] \end{aligned} \tag{7}$$

(3) 퍼미언스 특성식

영구자석의 두께로 인한 유효공극길이 증가를 고려하기 위해 2차원적인 슬롯팅 효과를 고려한 퍼미언스 특성식은 식 (8)로 주어진다.

$$\lambda(\theta, r) = \Lambda_o(r) + \sum_{\varepsilon=1}^{\infty} \Lambda_\varepsilon(r) \cos \varepsilon N_s(\theta + \alpha_{ma}) \tag{8.a}$$

$$\Lambda_0(r) = \frac{1}{K_c}\left[1 - 1.6\Gamma \frac{b_o}{\tau_s}\right] \tag{8.b}$$

$$\Lambda_\varepsilon(r) = -\Gamma(r)\frac{4}{\pi\varepsilon}\left[0.5 + \frac{(\varepsilon \frac{b_o}{\tau_s})^2}{0.78125 - 2(\varepsilon\frac{b_o}{\tau_s})^2}\right] \times \sin\left(1.6\pi\varepsilon\frac{b_o}{\tau_s}\right) \tag{8.c}$$

여기서 α_{ma}는 슬롯 각, K_c는 카터 계수, τ_s은 슬롯 피치이며 $\Gamma(r)$은 고정자 슬롯을 축으로 반경방향 위치에 의존하는 함수로 이 함수에 의해 2차원적인 슬롯팅효과가 고려된다 [4]. 영구자석 및 전기자 권선에 의한 자속밀도 특성식에 식 (8.a)를 곱함으로써 슬롯팅 효과를 고려할 수 있다.

(4) 토크 특성식

토크 $T = r \times F$를 구하기 위하여 $F = \int_v J \times B dv$를 이용하여 토크 특성식을 유도하는데, 고정권선의 전류분포를 current sheet라 가정하였으므로 체적적분이 아닌 면적적분을 시행하여 식 (9)로 주어지는 토크 특성식을 얻을 수 있다. 여기서 l_a는 전동기의 유효 축 방향 길이이고, B_n은 고조파 차수를 포함한 영구자석에 의한 반경방향 자속밀도의 r에 관한 함수이다.

(5) 역 기전력 특성식

역기전력 특성식은 $V_{emf} = -d\Psi/dt$로부터 구할 수 있는데, 여기서 Ψ는 영구자석에 의한 쇄교자속이므로 본 논문에서 제시한 초고속기의 한 상에 대한 역기전력 특성식은 식 (10)으로 주어진다.

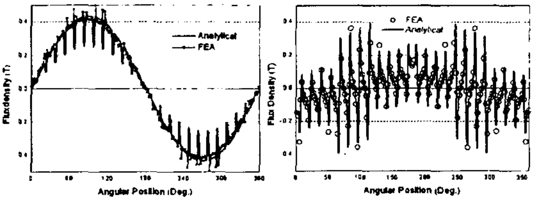
$$V_{emf} = -2N_{pph} r_s K_{dn} l_a \Lambda_0 B_n \omega_r \cos(\delta/2 + \alpha_{ma}) \tag{10}$$

여기서 N_{pph}는 상당 턴 수이고 K_{dn}은 분포권 계수이며 ω_r은 각속도 이다.

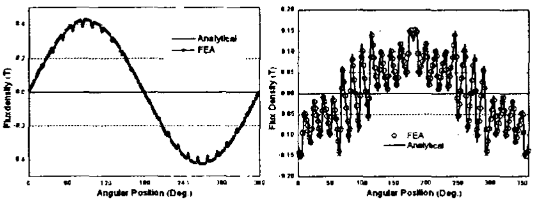
$$\begin{aligned} T &= \Lambda_0 r_s r_o l_a B_n \sum_{n=1,3,5\ldots} I_n \cdot \Bigg\{\Bigg[\frac{I_{ap}}{q+1}\sin\left\{\frac{(q+1)\delta}{2} - \alpha_{ma}\right\} + \frac{I_{bp}}{q+1}\sin\left\{\frac{(q+1)\delta}{2} - \alpha_{ma} - \frac{2q\pi}{3}\right\} \\ &\quad + \frac{I_{cp}}{q+1}\sin\left\{\frac{(q+1)\delta}{2} - \alpha_{ma} - \frac{4q\pi}{3}\right\}\Bigg] - \Bigg[\frac{I_{ap}}{q+1}\sin(-\alpha_{ma}) + \frac{I_{bp}}{q+1}\sin(-\alpha_{ma} - \frac{2q\pi}{3}) + \frac{I_{cp}}{q+1}\sin(-\alpha_{ma} - \frac{4q\pi}{3})\Bigg]\Bigg\} \\ &\quad - \Lambda_0 r_s r_o l_a B_n \sum_{n=3,5\ldots} I_n \cdot \Bigg\{\Bigg[\frac{I_{ap}}{q-1}\sin\left\{\frac{(q-1)\delta}{2} - \alpha_{ma}\right\} + \frac{I_{bp}}{q-1}\sin\left\{\frac{(q-1)\delta}{2} - \alpha_{ma} - \frac{2q\pi}{3}\right\} \\ &\quad + \frac{I_{cp}}{q-1}\sin\left\{\frac{(q-1)\delta}{2} - \alpha_{ma} - \frac{4q\pi}{3}\right\}\Bigg] - \Bigg[\frac{I_{ap}}{q-1}\sin(-\alpha_{ma}) + \frac{I_{bp}}{q-1}\sin(-\alpha_{ma} - \frac{2q\pi}{3}) + \frac{I_{cp}}{q-1}\sin(-\alpha_{ma} - \frac{4q\pi}{3})\Bigg]\Bigg\} \end{aligned} \tag{9}$$

2.3 해석결과와 유한요소 결과와의 비교

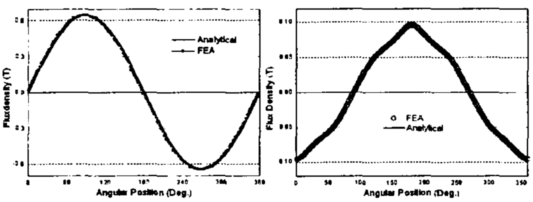
그림 3은 반경방향 위치에 따른 슬롯팅효과가 고려된 무 부하 시 자계 분포 및 전기자 반작용 자계 분포에 대한 해석결과와 유한 요소 해석결과의 비교를 보여준다. 그림에서 알 수 있듯이 고정자 내반경 즉 치로부터 멀어질수록 슬롯팅효과는 나타나지 않으며 해석결과는 유한요소해석결과와 매우 잘 일치함을 알 수 있다. 그림 4는 부하 시 자계분포의 시간과 반경방향 위치에 따른 해석결과와 유한요소 해석결과와의 비교를 보여주며 그림 5는 토크 및 역기전력에 대한 해석결과와 유한요소 해석결과와의 비교를 보여준다. 모두 해석결과와 유한요소해석결과가 매우 잘 일치함을 볼 수 있다.



(a) 무부하시 자계분포 전기자 반작용 자계 분포

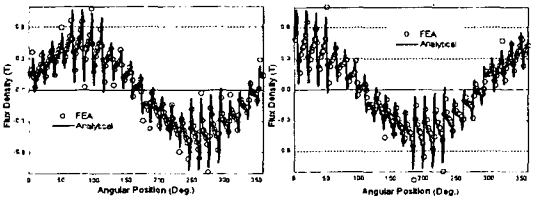


(b) 무부하시 자계분포 전기자 반작용 자계 분포

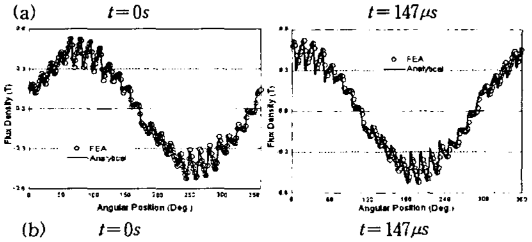


(c) 무부하시 자계분포 전기자 반작용 자계 분포

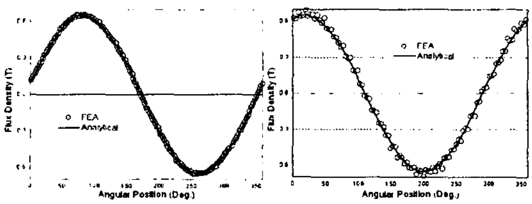
그림 3. 자계분포에 대한 반경방향 위치에 따른 해석결과와 유한요소해석결과와의 비교 : (a) r_s (b)기계적 공극 (c) r_o



(a) $t=0s$ $t=147\mu s$

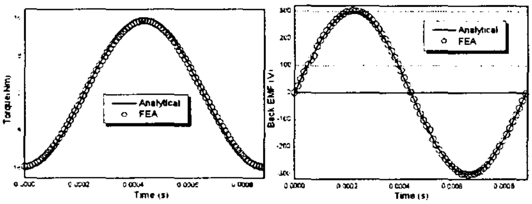


(b) $t=0s$ $t=147\mu s$



(c) $t=0s$ $t=147\mu s$

그림 4. 부하 시 자계분포에 대한 반경방향 위치 및 시간에 따른 해석결과와 유한요소해석결과와의 비교 : (a) r_s (b)기계적 공극 (c) r_o



(a) (b)

그림 5. 해석결과와 유한요소결과와의 비교 : (a) 토크 및 (b) 역기전력

3. 결 론

본 논문은 175마력 80,000 rpm급 초고속 전동기의 슬롯팅을 고려한 무 부하 시 자계분포, 전기자 반작용 자계 분포, 부하 시 자계분포, 토크 및 역기전력 특성 해석을 수행하였다. 해석법은 2차원적인 극 좌표계와 자기 벡터자위를 이용한 공간고조파법을 사용하였고, 유한요소 해석을 수행, 결과를 공간고조파법 해석결과와 비교·검토하여 해석결과의 타당성을 입증함으로써, 초고속전동기의 설계 및 특성해석에 있어 본 논문이 제시한 일련의 과정은 매우 유용할거라 사료된다. 마지막으로 향후 연구에서는 초고속전동기의 저항 및 인덕턴스 산정에 대한 연구를 수행해 나아갈 것이다.

[참 고 문 헌]

[1] 류동완, "EMB용 초고속 슬롯리스 브러시리스 영구자석 기기의 특성해석", 공학석사 학위논문, 충남대학교, 2001년 2월

[2] Z.Q.Zhu, K.Ng and D.Howe, "Design and Analysis of High Speed Brushless Permanent Magnet Motors", *EMD97, IEE,* No.444, pp.381-385, Sep. 1997.

[3] 장석명, 최장영, 조한욱, 양현섭, 이성호, "직경방향으로 착자된 영구자석형 고속 모터의 자계 특성, Part I : 무부하시 자계분포", 대한전기학회 추계 학술대회 2003, B권 pp.101-103.

[4] Z.Q.Zhu and D.Howe, "Instantaneous Magnetic Field Distribution in Permanent Magnet Brushless dc Motors, Part IV: Magnetic Field on Load", *IEEE Trans. Magn.,* vol. 29, no. 1, pp.152 158, 1993.