

Design of High-Speed Brushless DC Motor for Turbo-Compressor

張錫明* · 趙漢旭† · 崔璋英** · 崔相圭*** · 鄭然鎬§

(Seok-Myeong Jang · Han-Wook Cho · Jang-Young Choi · Sang-Kyu Choi · Yeon-Ho Jeong)

Abstract - Recently, high-speed centrifugal turbo-compressors have been under intensive research and development. Since, compared to conventional compressors, high-speed centrifugal compressors have numerous qualities such as simple structure, light weight, small size, and high efficiency, etc. In cope with such industrial demands, a high-speed brushless DC motor for a 50-kW, 70-krpm turbo-compressor was developed based on a 2-D analytical method, of which design was verified using the FE analysis. A prototype machine was also fabricated and tested to confirm the analytical design. Preliminarily obtained experimental data using the prototype machine shows the validity of the analytical approach.

Key Words : High-Speed Brushless DC Motor, Turbo-Compressor, 2-D Analytical Method

1. 서 론

최근 초고속 회전기 시스템은 산업 현장이나, 특수 목적용으로써 각광받는 분야중 하나이다. 특히, 공작기계의 스피들 구동용, 또는 터보 압축 펌프나 마이크로 터빈과 같은 고용량 소형 시스템에 필수적인 요소 기술이라 할 수 있다 [1]-[3]. 초고속 회전기는 기어가 필요없이 직접 구동 드라이버나 가스터빈 등에 접속되어 직접 초고속 회전력을 얻을 수 있으므로, 시스템에서 초고속 회전기류를 적용할 경우 소형 콤팩트화, 비용의 절감 및 고효율화를 꾀할 수 있는 장점을 갖는다. 그러나, 회전자의 고속회전에 따른 회전자의 기계적인 스트레스나 초고주파 입력전원에 의한 철손증가, 제어 기술, 베어링, 방열과 냉각 등 전기적, 기계적 물성적으로 광범위한 문제가 야기되므로, 더욱 활발한 연구가 요구된다 [4][5].

그 동안에는 농형유도전동기가 견고성과 유지보수, 안정적 운전 등의 장점 때문에 산업체의 여러 분야 뿐만아니라 고속 특성이 우수하므로, 고속 회전기의 구동원으로도 많이 사용되어 왔다. 그러나, 저속 영역에서 효율이 낮고, 초고속 구동시 농형 알루미늄 바, 슬롯-치의 자기적 구조가 내구성 측면에서 적합하지 않을 뿐만 아니라, 항상 슬립이 존재하는 기본 특성 때문에, 2차측 회전자 바의 동손에 의한 열이 크

게 발생하므로 효율 및 역률 저하 등의 많은 문제점을 야기한다. 또한, 회전자의 구조가 간단하고, 내구성이 강한 릴럭턴스 전동기의 경우 가격이 저렴하고, 저속에서도 토크가 큰 장점을 갖고 있으나 토크의 맥동이 크고, 소음 및 진동 등의 문제점으로 근본적 제약을 받으며, 정밀한 제어도 불가능한 단점을 갖는다.

최근, 희토류계 영구자석의 발달로, 구조가 간단하고, 콤팩트한 NdFeB 영구자석을 회전계자로 하는 브러시리스 기기가 수십만 rpm 까지의 초고속화에 가장 적합한 것으로 평가되고 있다[6]. 영구자석형 전동기의 경우 고정자에만 권선이 배치되어 있어, 고정자와 회전자가 동시에 발열하는 유도전동기에 비해 냉각을 단순화 할 수 있고, 고밀도 영구자석의 사용으로, 작은 체적으로 높은 출력을 낼 수 있다는 큰 장점을 갖는다.

본 논문에서는 초고속 터보 압축기 시스템에 적용되는 50kW, 70000rpm급의 정격출력 및 정격속도를 갖는 터보 컴프레서용 초고속 전동기로 영구자석형 브러시리스 DC(이하 BLDC) 전동기를 선정하고, 이에 대하여, 공간고조파법 및 등가자기회로법을 이용한 설계 기법을 제시 하였다. 설계 모델은 공간고조파를 최소화 하기 위하여 직경방향으로 자화된 영구자석을 갖고 있으며, 이에 따른 자계 및 공극 자속밀도 분포 특성을 기초로하여 설계를 수행하였다. 또한, 설계된 초고속 BLDC 전동기는 공기 베어링 및 3상 인버터 시스템과 결합하고, 실험을 통하여 본 논문에서 제시하는 설계 및 해석의 타당성을 검증하였다.

2. 설계 조건

표 1은 요구되는 초고속 BLDC 전동기의 기본 설계 조건

† 교신저자, 正會員 : 忠南大 工大 電氣工學科 博士課程
E-mail : hwcho@cnu.ac.kr

* 正會員 : 忠南大 工大 電氣工學科 教授 · 工博

** 正會員 : 忠南大 工大 電氣工學科 博士課程

*** 正會員 : 韓國 機械 研究院 責任研究員

§ 正會員 : 韓國 電氣 研究院 先任研究員

接受日字 : 2005年 2月 24日

最終完了 : 2005年 5月 3日

을 나타낸다. 전동기의 정격 출력은 50kW이고, 정격속도는 70,000 rpm, 최대 80,000 rpm 까지 요구된다. 설계되는 초고속 구동에 적합하도록 하기 위하여 영구자석 회전자는 2극 직경방향 자화형태를 선정하였고, 구동 방식은 3상 Full Bridge 인버터의 120도 도통형 구동을 선정하였다. 그림 1은 초고속 BLDC 전동기의 설계 모델을 나타낸다. 슬롯 수는 24개로 분포권의 권선방식을 갖는 고정자와 강자성체 축, 영구자석, 그리고 영구자석 구속용 탄소섬유/에폭시 슬리브로 구성되는 회전자를 갖는다.

표 1. 초고속 BLDC 전동기의 설계요구 사양

Table 1. Required specification of High-Speed BLDC Motor

항목	사양	항목	사양
정격출력	50 (kW)	정격속도	70,000 (rpm)
계통전압	380 (V)	상 수	3
구동방식	120° 도통형	극 수	2

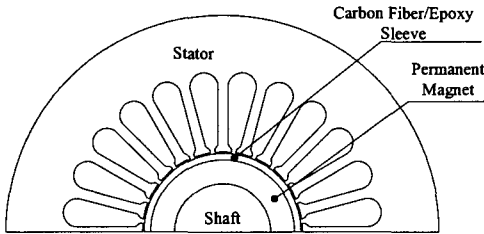


그림 1. 초고속 BLDC 전동기의 구조

Fig. 1 Configuration of high-speed BLDC motor

3. 초고속 BLDC 전동기의 자계특성 해석 기법

3.1 TRV 및 체적 결정

앞서 언급된 전동기의 초기 체적 결정을 위한 출력 방정식은 식(1)과 같다[8].

$$T = KD_r^2 L_{stk} \quad (1)$$

여기서, 기기의 설계 조건 및 설계자의 경험에 의해 결정되는 K 는 출력 상수(output coefficient)이고, D_r 과 L_{stk} 는 각각 회전자의 직경과 축방향 길이를 나타낸다. 식(1)은 체적당 발생토크(Torque per unit rotor volume : TRV)로 나타내기도 하며, 이것은 식(2)와 같다.

$$TRV = \frac{T}{\frac{\pi}{4} D_r^2 L_{stk}} \quad (kNm/m^3) \quad (2)$$

그림 2는 표 1에 제시된 초고속 BLDC 전동기의 설계 요구사항에 대한 토크, 회전자의 직경 및 축방향 길이의 관계를 나타낸다. 이때, 설계자에 의해 경험적으로 정해지는 TRV는 설계 조건과 냉각방식을 고려하여 약 50으로 설정하였고, 이때, 전동기의 출력에 대한 초기 회전자 직경 및 축방향 길이는 약 50mm, 70mm로 결정되었다. 이때, TRV 방법에 의한 초기 회전자의 설계치는 정격속도에서 비교적 안전한 접선속도 범위를 갖는 것을 알 수 있다.

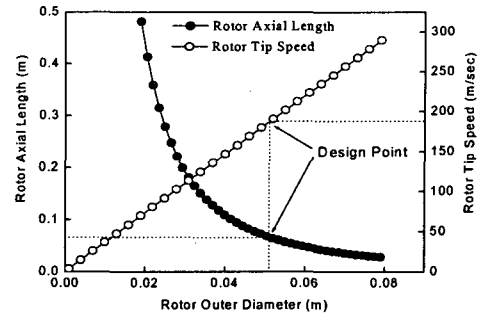


그림 2. 50kW, 70000 rpm 초고속 BLDC 전동기의 체적결정 및 회전자 접선속도

Fig. 2 Volume and tangential speed of high-speed BLDC motor with 50kW, 70000rpm

3.2 자계 특성 해석

설계 모델이 직경방향 자화된 영구자석 회전자와 강자성의 고정자 영역 및 축 영역을 갖고 있으므로, 해석의 편의를 위하여 그림 1의 모델은 그림 3과 같이 r, θ 축을 갖는 극좌표 해석모델로 모델링이 가능하다[9][10].

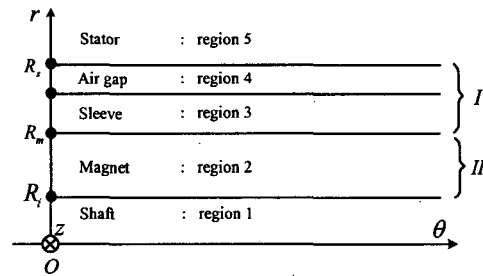


그림 3. r, θ 축을 갖는 극좌표계 5영역 해석모델

Fig. 3 5-layer analysis model in polar coordinate system with r, θ axis

또한, 해석결과의 큰 영향이 없는 범위에서 해석을 간이화 하기 위하여 그림 3에 제시된 모델에 다음과 같은 가정을 적용한다.

- i) 1차 축(region 1-3)은 θ 방향으로 회전 운동한다.
- ii) 자기 벡터 포텐셜은 z 방향 성분만을 갖는다.
- iii) 철심(고정자 및 축 영역)의 투자율 ∞ 의 값을 갖는다.
- iv) 해석영역은 두께가 각각 R_i, R_m, R_s 인 5개의 다중층으로 구성되고, 영구자석의 도전율은 0이다.
- v) 복합재로 구성되는 슬리브영역은 공극영역과 전자기적 물성이 같다.

원통형 해석 모델에서의 자기 벡터 포텐셜 A_n 은 θ 방향의 분포특성과, z 방향 성분을 갖고 있으므로 식(3)과 같이 쓸 수 있다.

$$A_n = A_{zn} e^{-jnp\theta} i_z \quad (3)$$

여기서 $k_n = n\pi/\tau = np$ 이며, τ 는 극간격, n 은 공간고조파의 차수, p 는 극쌍수를 나타낸다. 한편, 맥스웰방정식에 의해 식(4)-(6)을 정의 할 수 있다.

$$\nabla \times H = J_f \quad (4)$$

$$\nabla \cdot B = 0 \quad (5)$$

$$B = \mu_0(H + M) \quad (6)$$

식(4)-(6)에 Coulmn Guage, Vector Identity를 적용하면, 해석 모델의 지배방정식을 식(7)과 같이 쓸 수 있다.

$$\nabla^2 A_n = -\mu_0(\nabla \times M) \quad (7)$$

식(7)의 우변을 계산하기 위하여, 먼저 직경방향 자화된 영구자석의 자화 M 을 정의하면 식(8)과 같다.

$$M = \sum_{n=odd}^{\infty} M_m e^{-jnp\theta} i_r \quad (8)$$

따라서, 식(8)을 식(7)에 대입해서 정리하면, 식 (9)가 유도된다.

$$\frac{\partial^2}{\partial r^2} A_{zn} + \frac{1}{r} \frac{\partial A_{zn}}{\partial r} - \left(\frac{np}{r}\right)^2 A_{zn} = -j\mu_0 \frac{np}{r} M_m \quad (9)$$

식(9)로 표현되는 지배 방정식은 Cauchy-Euler의 형태를 갖는 미분방정식이며, 벡터포텐셜의 형태로 도출되는 해를 이용하여 자계 특성식은, 식(10)과 같은 형태로 기술될 수 있다.

$$B_m = -\frac{jnp}{r} A_{zn} e^{-jnp\theta}$$

$$B_{\theta n} = \frac{\partial}{\partial r} A_{zn} e^{-jnp\theta} \quad (10)$$

이때, A_{zn} 은 식(9)의 완전해로써, 식(11)과 같다.

$$A_{zn} = A_{znh} + A_{znp}$$

$$= \sum_{n=odd}^{\infty} (A_1 r^{np} + A_2 r^{-np} + A_{znp}(r)) \quad (11)$$

여기서, 일반해(A_{znh})와 특수해(A_{znp})는 식(12)와 같다.

$$A_{znh} = \sum_{n=odd}^{\infty} (A_1 r^{np} + A_2 r^{-np})$$

$$A_{znp} = \begin{cases} \sum_{n=odd}^{\infty} \frac{j\mu_0 np M_m}{(np)^2 - 1} e^{-jnp\theta} & np \neq 1 \\ -\frac{j\mu_0}{2} r \ln r M_m e^{-jnp\theta} & np = 1 \end{cases} \quad (12)$$

식(12)에서 $np=1$ 일때와 $np \neq 1$ 일때로 나누어 다시 해석을 해야 하는데, 본 논문에서는 2극의 해석 모델을 다루므로, $np=1$ 일때의 자계 특성식은 식(13)으로 쓸 수 있다.

$$B_m^I = -\frac{j}{r} [A_1^I r + A_2^I r^{-1}] e^{-j\theta}$$

$$B_m^{II} = -\frac{j}{r} [A_1^{II} r + A_2^{II} r^{-1} - \frac{j\mu_0 r \ln r M_m}{2}] e^{-j\theta}$$

$$B_{\theta n}^I = [A_1^I - A_2^I r^{-2}] e^{-j\theta}$$

$$B_{\theta n}^{II} = [A_1^{II} - A_2^{II} r^{-2} - \frac{j\mu_0 M_m (\ln r + 1)}{2}] e^{-j\theta} \quad (13)$$

이때, 각 경계면서의 경계조건은 식(14)로 주어진다.

$$\begin{aligned} r=R_i & \quad B_{\theta n}^{II} = 0 \\ r=R_m & \quad B_m^{II} = B_m^I \\ & \quad B_{\theta n}^{II} = B_{\theta n}^I \\ r=R_s & \quad B_{\theta n}^I = 0 \end{aligned} \quad (14)$$

그림 4는 그림 3의 r, θ 축을 갖는 극좌표 해석모델에 대하여, 공간고조파법에 의해 계산된 축 반경의 변화에 따른 공극 자속 밀도의 변화 추이를 나타내며, 요구되는 공극 자속밀도를 만족하는 축의 반경 운전 온도에 따라 산정하였다. 그림 5는 그림 4에 의해 결정된 영구자석 및 축을 갖는 5영역 해석모델에 대하여 영구자석의 운전온도에 따른 공극 자속밀도의 분포를 나타낸다. 유효요소 해석과 비교한 결과가 공간고조파법에 의해 계산된 결과와 매우 잘 일치하므로, 그림 4와 그림 5의 해석 및 설계 과정이 타당함을 명확히 나타낸다.

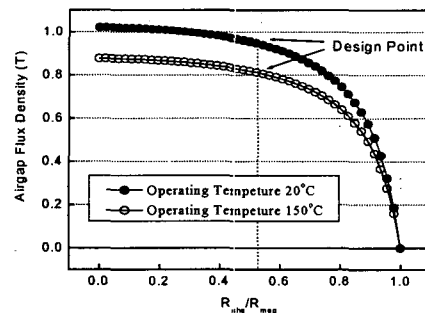


그림 4. 축반경의 변화에 따른 공극자속밀도
Fig. 4 Airgap flux density for various values of shaft radius

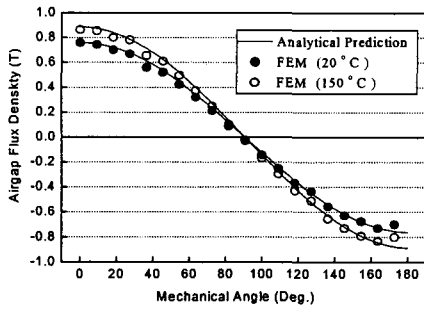


그림 5. 설계된 모델의 공극자속밀도 분포 특성
Fig. 5 Airgap flux density distribution for the designed model

3.2 역기전력 특성 해석

초기 설계시 개략적인 역기전력 및 고정자 상당턴수의 산정은 등가 자기회로 해석법에 의하여 수행된다. 초기 설계시 자기 등가회로 해석법에 의하여 산정된 상당턴수는 다시 공간고조파 해석 적용되어 역기전력을 재계산하게 된다. 이때, 상당턴수는 등가 자기회로해석법에 의해 임의의 수의 정수배로 결정되므로, 요구되는 역기전력을 이끌어 내기 위하여 공간고조파해석을 통해 축방향 길이나 고정자 내경의 길이를 변경해가며, 요구되는 설계치에 보다 정확히 접근할 수 있도록 설계 알고리즘을 작성하였다.

고정자가 개방된 상태에서 무부하 역기전력의 최대값 E_{max} 라 할때, E_{max} 는 식(15)와 같이 표현될 수 있다[11].

$$E_{max} = N_m k_{wl} B_g L_{stk} R_s N_{turn} \omega_n \quad (15)$$

여기서, N_m 은 극수, k_{wl} 은 권선계수(= $k_d k_p$: k_d -분포계수, k_p -단절계수), B_g 는 3.2 절에서 계산된 공극 중앙에서의 자속밀도의 최대값, L_{stk} 은 고정자의 축방향 길이, N_{turn} 은 상당 턴수(= $N_s N_{spb}$: N_s -슬롯당 턴수, N_{spb} -매극매상당슬롯수) 그리고 ω_n 은 회전자의 각속도이다. 요구되는 역기전력이 E_{ref} 라 하면 슬롯당 턴수 N_s 는 식(16)과 같이 계산될 수 있다.

$$N_s = \frac{E_{ref}}{N_m k_{wl} B_g L_{stk} R_s N_{spb} \omega_n} \quad (16)$$

식(16)에서 E_{ref} 를 만족하는 슬롯당 턴수 N_s 는 계산된 값보다 큰 가장 가까운 정수로 결정되며, 상당 턴수 N_{turn} 은 다시 식(17)로 표현된다.

$$N_{turn} = N_s N_{spb} \quad (17)$$

그리고, 역기전력의 최대값 E_{max} 는 식(17)에 의해 계산된 N_{turn} 이 적용되어 공간고조파법에 의하여 보다 정확히

재계산될 수 있는데, 먼저 고정자의 1 슬롯피치를 쇠교하는 자속을 $d\phi$ 라 할때, 공간고조파법에 의하여 재계산된 공극 중앙에서 자속밀도의 최대치 B_g 과 1 슬롯피치의 면적 S 에 의해 식(18)과 같이 정의된다.

$$d\phi = B_g S d\theta \quad (18)$$

따라서, 1 슬롯피치에 대한 쇠교자속은 식(19)와 같다.

$$\begin{aligned} \psi &= \int_{-\frac{\theta_s}{2}}^{\frac{\theta_s}{2}} B_g R_s L_{stk} d\theta \\ &= 2 R_s L_{stk} B_g \sin \frac{\theta_s}{2} \end{aligned} \quad (19)$$

여기서, θ_s 는 슬롯피치, R_s 는 고정자의 내반경이며, 1 상당 영구자석에 의한 쇠교자속 λ_f 는 식(20)에 의해 계산할 수 있다.

$$\lambda_f = N_{spb} N_{tps} \psi \quad (20)$$

여기서, N_{spb} 는 매극 매상당 슬롯수, N_{tps} 는 슬롯당 턴수를 나타낸다. 그러므로, 역기전력의 최대값은 각속도 ω_n 과 쇠교자속의 곱으로 표현되고, 이는 식(21)과 같다.

$$E_{max} = \omega \lambda_f \quad (21)$$

그림 6은 70000 rpm에서 계산된 역기전력의 크기를 나타내며, 유한요소해석치와 잘 일치함을 보인다.

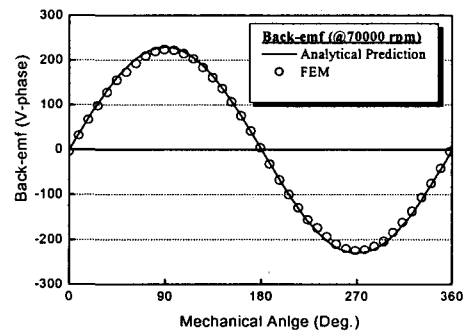


그림 6. 설계된 전동기의 역기전력 해석 결과(@70000 rpm)
Fig. 6 Back-emf for the designed model(@70000 rpm)

3.4 회전자의 동적 거동 해석

본 절에서는 초고속 전동기 시스템에서 충분한 회전 안정성을 확보하기 위하여 공기베어링을 고려한 회전자 조립체의 동적 거동 해석에 관한 내용을 다룬다. 해석은 회전자 동적거동해석 전용 상용 프로그램인 XLrotor(엑셀로터)를 사용하였다. XLrotor는 타 프로그램들에 비해 모델링이 간편하고, 치수의 입력 등이 용이하며, 계산시간이 매우 빠른

장점을 갖는다. 그림 7은 회전자 동특성 해석을 위한 모델링을 나타낸다. 회전자 조립체의 전체 축방향 길이는 245.5mm 이고, 영구자석 영역의 축방향 길이는 80mm 이다. 그림 8은 베어링 강성(Bearing Stiffness)의 변화에 따른 위험속도(Critical Speed)의 변화를 나타낸다. 그림 9(a)-(c)는 각각 회전자 동적 거동 해석에 의한 Cylindrical Mode, Conical Mode, 1-st Bending Mode를 나타낸다. 그림에서 보여지는 바와 같이 1-st Bending Mode가 일어나는 회전자의 속도가 228,000 rpm 정도 이므로, 설계된 전동기의 회전자는 기계적으로 운전특성이 충분히 안정적임을 확인 할 수 있다.

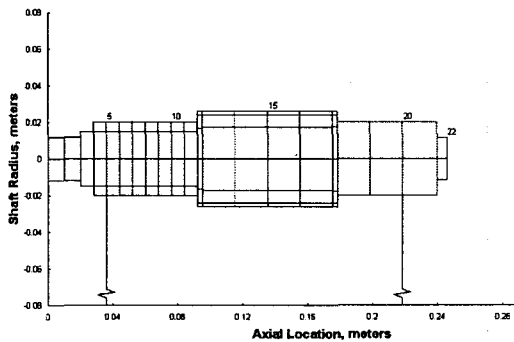


그림 7. 회전자의 동특성 모델링
Fig. 7 Dynamic modeling of the rotor

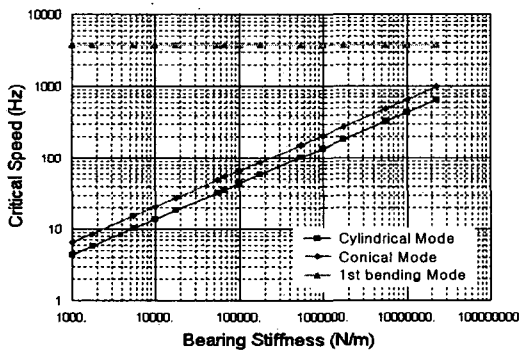


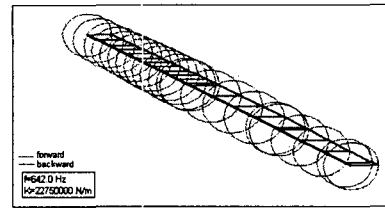
그림 8. 베어링 강성에 따른 회전자 위험속도의 변화
Fig. 8 Variation of critical speed according to bearing stiffness

4. 초고속 BLDC 전동기의 시제품 제작

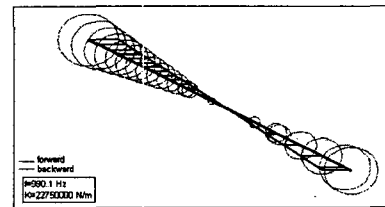
4.1 주요 소재의 선정

(1) 규소강판

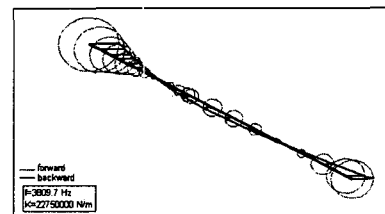
본 논문에서 초고속 BLDC 전동기로 제안하는 모델은 기계적으로 비교적 안정하고, 고속운전에 유리한 구조로 최대 회전속도 80,000 rpm에서 1333Hz 로 운전하게므로, 고정자의 철손을 최소화 하기 위하여 규소강판은 0.15mm 의 저손실 박강판(ST-150)을 사용하였다.



(a)Cylindrical Mode



(b) Conical Mode



(c)1-st Bending Mode

그림 9. 모드 형상
Fig. 9 Mode shapes

(2) 영구자석의 선정

영구자석은 최근 많이 응용되고 있는 잔류자속밀도와 보자력이 높은 네오디움계열의 영구자석을 사용하였다. 이는, 시스템 결합시 전동기가 장착될 공간의 온도가 약 80℃ 이상으로 예측되며, 전동기의 절연등급이 H종(180℃) 이므로 충분한 내열특성을 갖는지 충분히 검토한 후 결정하였다. 사용된 영구자석의 잔류자속밀도에 대한 온도계수는 -0.1% /℃ 이고, 보자력에 대한 온도계수는 -0.49%/℃ 로 우수한 특성을 가지고 있다.

(3) 속도 및 위치 센서

일반적으로 많이 이용되는 속도 및 위치센서로는 광학식 엔코더와 자기식 홀센서가 있다. 그러나, 광학식 엔코더의 경우 임계속도가 약 5000~7000 rpm이고, 초고속으로 구동되는 전동기의 운전조건에는 적합하지 않으므로, 자기식 홀센서 3개를 고정자에 120도 간격으로 배치하여, 속도 및 위치의 센싱 그리고, IGBT의 스위칭에 이용하였다.

4.2 시제품 제작 과정

(1) 회전자 제작

회전자의 영구자석은 조립후 착자나 착자후 조립의 어느 한 과정을 사용될 수 있으며, 본 연구에서는 조립 후 착자를 하는 방식을 채택하였다. 또한 영구자석 및 복합재 슬리브의 기계적 결합은 재료의 냉각에 따른 부피 감소를 이용하여, 억지끼움을 하였다. 그림 10(a)는 제작된 회전자 조립체를 보여준다.

(2) 고정자 제작

고정자 코어는 0.15mm 의 박강판의 기계적 강도가 낮은 것을 감안하여 양 단부에는 0.35mm의 일반 규소강판 10장을 적층하여 단부에서의 기계적 고정을 위하여 적층하였으며, 적층후 권선작업은 수작업으로 시행하였다. 그림 10(b)는 권선 작업 및 홀센서의 부착이 완료된 고정자 조립체를 보여준다.

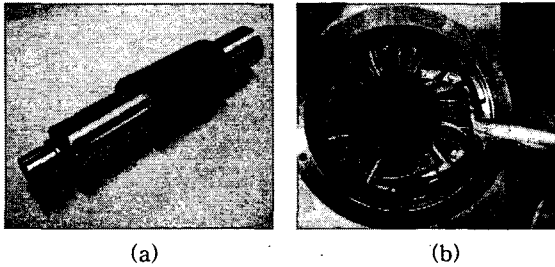


그림 10. 영구자석 회전자 및 고정자 조립체
Fig. 10 Permanent magnet rotor and stator assembly

(3) 베어링

초고속 회전기 시스템에서 주로 사용되는 베어링은 자기 베어링, 포일베어링, 에어베어링 등이다. 본 논문에서는 최근 회전형 터보 압축기용 초고속 전동기류에 가장 많이 적용되는 공기베어링을 사용하였다. 회전자 축외부 에어 펌프에 의하여 부상되며, 부상시 기계적 공극은 약 7 μ m 이다.

(4) 인버터

BLDC 전동기에서는 회전자의 위치를 검출하여 인버터 회로가 그 위치에 따른 정류작용을 수행한다. 인버터의 역할은 DC 전동기에서의 브러시, 정류자와 같은 역할을 하며, BLDC 전동기와 일반 브러시 DC 전동기의 정류과정 및 전압방정식, 속도-토크 특성이 거의 같다. 그림 11은 고속 IGBT 소자를 갖는 3상 전파방식 120° 도통형 인버터의 구성도를 나타낸다.

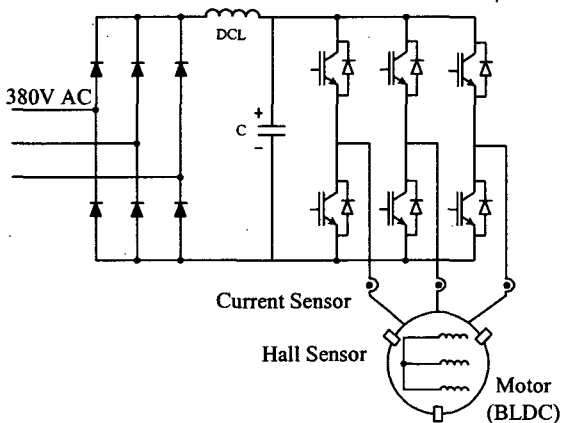


그림 11. 인버터 구성도
Fig. 11 Configuration of inverter

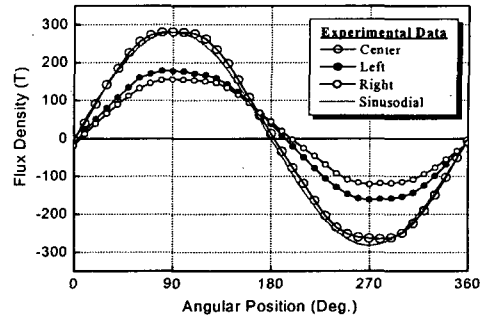


그림 12. 영구자석 자화 검증 측정 결과
Fig. 12 Test result of permanent magnet magnetization

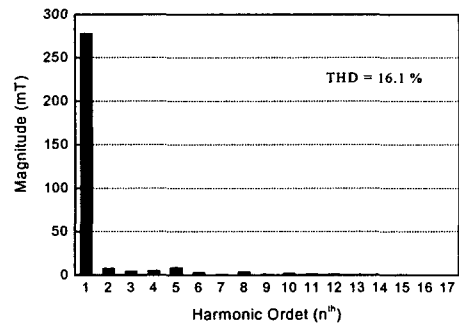


그림 13. 영구자석 자화의 FFT 분석
Fig. 13 FFT analysis result of permanent magnet magnetization

5. 시험 및 고찰

5.1 영구자석 착자 상태 시험

영구자석을 이용하는 전동기에서 회전자 영구자석의 자화 상태는 기기의 성능에 큰 영향을 미친다. 제작된 초고속 BLDC 전동기의 회전자 영구자석은 공극에서 정현적 자속 밀도를 얻기 위하여 직경방향으로 착자하였으며, 영구자석의 전체 축방향 길이에 대하여 착자 상태를 확인하기 위하여 영구자석의 착자 상태 시험을 하였다.

그림 12는 영구자석이 개방된 상태에서 측정된 표면 자속 밀도 측정 결과이며, 그림 13은 영구자석 중앙부분에서 자화의 FFT 분석 결과를 나타내며, THD가 약 16.1%로 비교적 양호한 자화상태를 갖고 있음을 확인할 수 있다.

5.2 역기전력 시험

그림 14와 그림 15는 각각 5700rpm에서 계산된 유한요소 해석 및 실험에 의한 역기전력 특성을 나타낸다. 그림 16은 설계된 초고속 BLDC 전동기의 해석적 방법 및 유한요소해석, 실험에 의한 속도에 따른 역기전력의 변화를 나타낸다. 역기전력 시험은 6000 rpm 이하의 저속에서 시행되었으며, 실험 결과가 해석적 방법 및 유한요소해석과 매우 잘 일치함을 볼 수 있다.

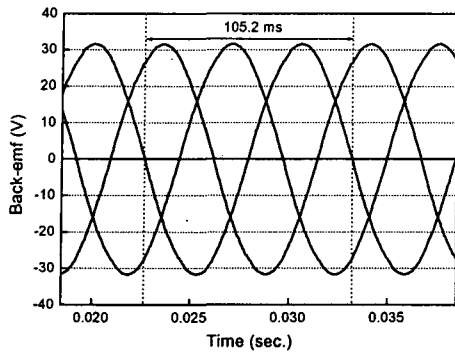


그림 14. 역기전력 특성 해석 결과 (5,700 rpm)
 Fig. 14 Back-emf waveform by simulation (5,700 rpm)

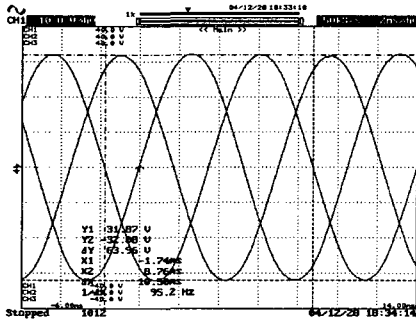


그림 15. 역기전력 특성 측정 결과 (5,700 rpm)
 Fig. 15 Back-emf waveform by measurement (5,700 rpm)

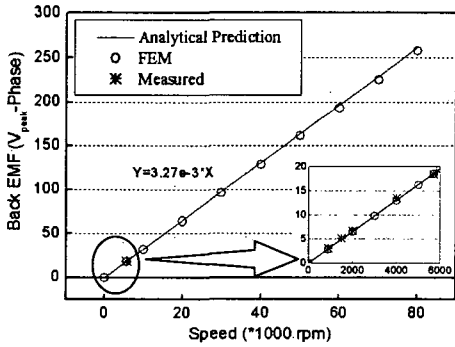


그림 16. 속도에 따른 역기전력 특성 해석 결과
 Fig. 16 Back-emf results for various values of speed by simulation

5.3 입력 전압 시험

그림 17은 해석적 방법 및 유한요소해석에 의한 DC 링크 전압에 대한 속도 특성 그래프이다. 설계된 전동기는 DC 링크 전압 100V 당 약18550 rpm의 회전속도 변화를 갖고 있으며, 무부하시 전계통 전압이 정류부를 통해 DC로 변성되어 전동기에 인가될 때, 속도는 약 83699 rpm 으로 해석 되므로, 설계된 전동기가 요구사양에 만족하도록 설계 되었음을 확인 할 수 있다.

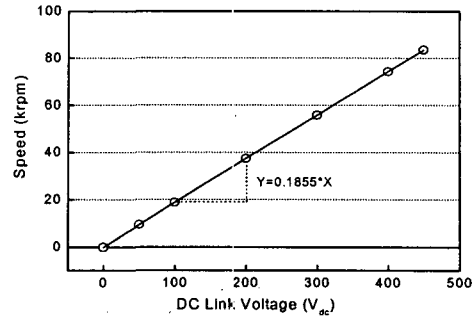


그림 17. DC 링크 전압에 따른 속도 특성 해석 결과
 Fig. 17 Speed characteristics for various values of DC link voltage by simulation

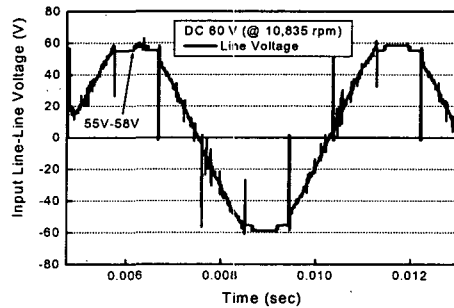


그림 18. 입력 전압 특성 해석 결과 (10835 rpm - 20V/div)
 Fig. 18 Input voltage characteristics for various values of DC link voltage by simulation

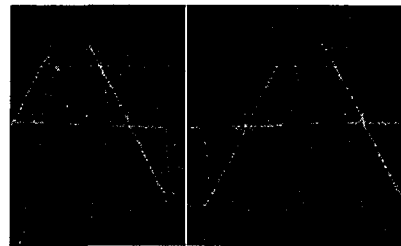


그림 19. 입력 전압 특성 측정 결과 (10835 rpm - 20V/div)
 Fig. 19 Input voltage characteristics for various values of DC link voltage by measurement

그림 18과 그림 19는 DC 링크 전압 60V에서 유한요소해석에 의한 시뮬레이션 및 시험 파형을 나타내며, 설계된 모델의 해석 결과가 실험결과가 잘 일치함을 확인할 수 있다.

6. 결 론

본 논문에서는 터보 압축기 시스템의 핵심 요소기술인 초고속 BLDC 전동기에 관하여 공간고조파법 및 등가 자기회로법을 이용한 설계 기법을 제시하였다. 설계 모델은, 시스템에서 요구되는 50kW, 80000rpm 급 초고속 전동기의 정격

속도 및 정격부하상태에서 설계사양을 만족시킬 수 있도록 특성방정식을 바탕으로 설계를 하였다. 또한, 기본 설계시 초고속 운전상태에서의 기계적 안정성을 고려하기 위하여 회전자의 동적해석을 수행을 하여 결과를 제시하였다.

설계된 BLDC 전동기는 제작되어 유한요소해석 및 실험을 통하여 그 특성을 검증하였고, 터보 압축기 시스템용 초고속 기기로서의 응용성을 검토하였다. 한편, 공기베어링과 전력 계측장치, 진동 계측장치 등을 구성하고, 성능시험을 통하여 전동기의 역기전력 특성 및 입력 전압 특성, 파형 및 크기 등의 결과를 도출 하였다. 향후, 공기베어링, 구동드라이버를 포함하는 전체 시스템의 안정도 향상 및 고속화를 통해 보다 정밀하고 다양한 연구를 진행하고자 한다.

감사의 글

본 논문은 에너지관리공단 신재생에너지센터의 대체에너지기술개발사업으로 수행되고 있는 "부하추종형 고효율 지열히트펌프 시스템 개발" 과제의 일부와 산업자원부에서 시행한 전력산업 인프라 구축 지원 사업으로 수행된 논문입니다.

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] Bon-Ho Bae, Seung-Ki Sul, Jeong-Hueck Kwon and Ji-Soeb Byeon, "Implementation of sensorless vector control for super-high-speed PMSM of turbo-compressor," IEEE Trans. Indust. Applicat., vol.39, May./June., 2003.

[3] Jason D.Ede, Z.Q.Zhu, and D.Howe, "Rotor resonances of high-speed permanent magnet brushless machines," IEEE Trans. Indust. Applicat., vol.38, Nov./Dec., 2002.

[4] Isao Yakahashi et al, "A super high speed PM motor drive system by a quasi-current source inverter," IEEE Trans. Magn., vol. 30, pp.683-690, May/June, 1994

[5] Z.Q.Zhu, K.Ng, and D.Howe, "Design and analysis of high-speed brushless permanent magnet motors," Electrical Machines and Drives, pp.381-385, 1997.

[6] 이성호, 자기회로 구성조건에 따른 직선형 전자기 에너지 변환기의 정특성 해석, 박사학위논문, 충남대학교, 2003.

[7] K.Ng, Z.Q.Zhu and D.Howe, "Open-circuit field distribution in a brushless motor with diametrically magnetized PM rotor, accounting for slotting and eddy current effects", IEEE Trans. Magn., vol.32, pp.5070-5072, 1997.

[8] J.R. Hendershot Jr, TJE Miller, Design of Brushless Permanent Magnet Motors, Magna Physics Publishing and Clarendon Press · Oxford, 1994.

[9] Z.Q.Zhu, David Howe, Ekkehard Bolte, and Bernd Ackermann, "Instantaneous magnetic field distribution in brushless permanent magnet dc motors, part I : open-circuit field," IEEE Trans. Magn., vol.29, pp.124-135, 1993.

[10] Z.Q.Zhu, David Howe, "Instantaneous magnetic field distribution in brushless permanent magnet dc motors, part IV : magnetic field on load," IEEE Trans. Magn., vol.29, pp.152-158, 1993.

[11] D.C.Hanselman, Brushless Permanent Magnet Motor Design. McGraw-Hill, Inc.

저 자 소 개



장석명 (張錫明)

1949년 7월 3일생. 1986년 한양대 대학원 전기공학과 졸업(공학박사). 1989년 미국 Univ. of Kentucky (방문연구교수), 1978년~현재 충남대 전기공학과 교수, 현재 대한전기학회 부회장, 전기기기 및 에너지 변환 시스템 부문회 회장
Tel : 042-821-5658
E-mail : smjang@cnu.ac.kr
Homepage : http://sems.cnu.ac.kr



조한욱 (趙漢旭)

1976년 12월 3일생. 2002년 충남대 전기공학과 졸업(학사). 2004년 동 대학원 전기공학과 졸업(공학석사). 2004~현재 동 대학원 전기공학과 박사과정.
Tel : 042-821-7608
E-mail : hwcho@cnu.ac.kr

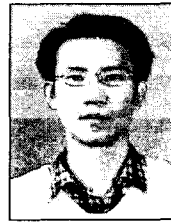


최 장 영 (崔 璋 英)

1976년 10월 20일생. 2002년 충남대 전기공학과 졸업(학사). 2005년 동 대학원 전기공학과 졸업(공학석사). 2005~현재 동 대학원 전기공학과 박사과정.

Tel : 042-821-7608

E-mail : aramis76@cnu.ac.kr



정 연 호 (鄭 然 鎬)

1968년 3월 10일생. 1993년 충남대 전기공학과 졸업(학사). 1996년 동 대학원 전기공학과 졸업(공학석사). 2001~현재 동 대학원 전기공학과 박사과정. 현재 한국 전기연구원 메카트로닉스 그룹 선임연구원

Tel : 055-280-1488

E-mail : yhjeong@keri.re.kr



최 상 규 (崔 相 圭)

1961년 1월 28일생. 1983년 한양대 기계공학과 졸업(학사), 1988년 Texas A&M University 석사졸업, 동 대학원 박사 졸업(공학박), 1993년~현재 한국기계연구원 재직, 관심분야 : 회전체 역학, 초고속 전동발전기, 가스베어링, 자기베어링

Tel : 042-868-7351

E-mail : skchoi@kimm.re.kr