

50kW 급 초고속 브러시리스 DC 전동기의 설계

최상규*, 조한욱, 최장영, 박지훈, 함상용*,장석영
한국기계연구원*, 충남대학교 전기공학과

Design of High-Speed Brushless DC Motor with 50kW Rated Power

Sang-Kyu Choi*, Han-Wook Cho, Jang-Young Choi, Ji-Hoon Park, Sang-Yong Ham*, Seok-Myeong Jang
KIMM*, Chungnam National University

Abstract - 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.

표 1. 초고속 BLDC 전동기의 설계요구 사양

항목	사양	항목	사양
정격출력	50 (kW)	정격속도	70(krpm)
계통전압	380 (V)	상수	3
구동방식	120° 도통형	극수	2

1. 서론

최근, 희토류계 영구자석의 발달로, 구조가 간단하고, 컴팩트한 NdFeB 영구자석을 회전계자로 하는 브러시리스 기기가 수십만 rpm까지의 초고속화에 가장 적합한 것으로 평가되고 있다[1][2]. 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[3][4].

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, 공간고조파 및 등가자기회로법을 이용한 설계 기법을 제시하였다. 설계 모델은 공간고조파를 최소로 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 조건을 나타낸다. 전동기의 정격 출력은 50kW이고, 정격 속도는 70,000 rpm, 최대 80,000 rpm까지 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.

3. 초고속 BLDC 전동기의 자계 특성 해석 기법

3.1 자계 특성 해석

원통형 해석 모델에서의 자기 벡터 포텐셜 A_n 은 θ 방향의 분포특성과, z 방향 성분을 갖고 있으므로 식(1)과 같이 쓸 수 있다.

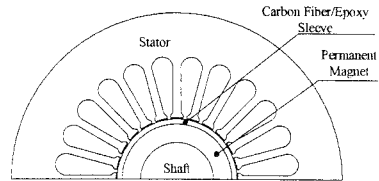


그림 1. 초고속 BLDC 전동기의 구조

$$A_n = A_{zn} e^{-jn\theta} i_z \quad (1)$$

여기서 $k_n = n\pi/\tau = np$ 이며, τ 는 극간격, n 은 공간고조파의 차수, p 는 극쌍수를 나타낸다. 한편, 맥스웰방정식에 Coulmn Gauge, Vector Identity를 적용하면, 해석 모델의 지배방정식을 식(2)와 같이 쓸 수 있다.

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

따라서, 식(1)을 식(2)에 대입하여 정리하면, 식(3)과 같은 편미분 방정식이 유도된다.

$$\frac{\partial^2}{\partial r^2} A_{zn} + \frac{1}{r} \frac{\partial A_{zn}}{\partial r} - \left(\frac{np}{r}\right)^2 A_{zn} = -j\mu_0 \frac{np}{r} M_{rn} \quad (3)$$

식(3)으로 표현되는 지배 방정식은 Cauchy-Euler의 형태를 갖는 미분방정식이며, 벡터포텐셜의 형태로 도출되는 해를 이용하여 자계 특성식은, 식(4)와 같은 형태로 기술될 수 있다.

$$B_{rn} = -\frac{jnp}{r} A_{zn} e^{-jn\theta} \quad (4)$$

$$B_{\theta n} = \frac{\partial}{\partial r} A_{zn} e^{-jn\theta}$$

본 논문에서는 2극의 영구자석을 갖는 해석 모델을 다루므로, $np=1$ 일때에 대하여, 지배 방정식을 정리하고, 자계특성식 구하면 식(5)를 쓸 수 있다.

$$\begin{aligned}
 B'_m &= -\frac{j}{r} [A'_1 r + A'_2 r^{-1}] e^{-j\theta} \\
 B''_m &= -\frac{j}{r} [A''_1 r + A''_2 r^{-1} - \frac{j_0 r \ln r M_m}{2}] e^{-j\theta} \\
 B'_{\theta n} &= [A'_1 - A'_2 r^{-2}] e^{-j\theta} \\
 B''_{\theta n} &= [A''_1 - A''_2 r^{-2} - \frac{j_0 M_m (\ln r + 1)}{2}] e^{-j\theta} \quad (5)
 \end{aligned}$$

이때, 각 경계면서의 경계조건은 식(6)으로 주어진다.

$$\begin{aligned}
 r = R_i & \quad B''_{\theta n} = 0 \\
 r = R_m & \quad B'_m = B''_m \\
 & \quad B''_{\theta n} = B'_{\theta n} \\
 r = R_s & \quad B'_{\theta n} = 0 \quad (6)
 \end{aligned}$$

그림 2(a)는 r, θ 축을 갖는 원통좌표 해석모델에 대하여, 계산된 축 반경의 변화에 따른 공극 자속 밀도의 변화 추이를 나타내며, 요구되는 공극 자속밀도를 만족하는 축의 반경 운전 온도에 따라 산정하였다.

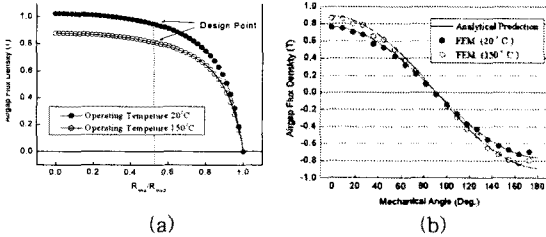


그림 2. 축반경의 변화에 따른 공극자속밀도

그림 2(b)는 그림 2(a)에 의해 결정된 영구자석 및 축을 갖는 5영역 해석모델에 대하여 영구자석의 운전온도에 따른 공극자속밀도의 분포를 나타낸다. 유한요소 해석과 비교한 결과가 공간고조파법에 의해 계산된 결과와 매우 잘 일치하므로, 해석 및 설계 과정이 타당함을 명확히 나타낸다.

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 접근 할 수 있도록 설계 알고리즘을 작성하였다.

고정자가 개방된 상태에서 무부하 역기전력의 최대값 E_{max} 라 할때, E_{max} 는 식(7)과 같이 표현될 수 있다.

$$E_{max} = N_m k_{w1} B_g L_{stk} R_s N_{turn} \omega_n \quad (7)$$

여기서, N_m 는 극수, k_{w1} 는 권선계수(= $k_d k_p$; k_d -분포계수, k_p -단절계수), B_g 는 3.1 절에서 계산된 공극 중앙에서의 자속밀도의 최대값, L_{stk} 는 고정자의 축방향 길이, N_{turn} 는 상당 턴수(= $N_s N_{stp}$; N_s -슬롯당 턴수, N_{stp} -매극매상당슬롯수) 그리고 ω_n 는 회전자의 각속도이다. 그리고, 역기전력의 최대값 E_{max} 는 계산된 N_{turn} 이 적용되어 공간고조파법에 의하여 보다 정확히 재계산될 수

있는데, 먼저 고정자의 1 슬롯피치를 쇄교하는 자속을 $\Delta\phi$ 라 할때, 공간고조파법에 의하여 재계산된 공극 중앙에서 자속밀도의 최대치 B_g 과 1 슬롯피치의 면적 S 에 의해 식(8)과 같이 정의된다.

$$\Delta\phi = B_g S \Delta\theta \quad (8)$$

따라서, 1 슬롯피치에 대한 쇄교자속은 식(9)와 같다.

$$\begin{aligned}
 \Psi &= \int_{-\frac{\theta_s}{2}}^{\frac{\theta_s}{2}} B_g R_s L_{stk} \Delta\theta \\
 &= 2 R_s L_{stk} B_g \sin \frac{\theta_s}{2} \quad (9)
 \end{aligned}$$

여기서, θ_s 는 슬롯피치, R_s 는 고정자의 내반경이며, 1 상당 영구자석에 의한 쇄교자속 λ_f 는 식(10)에 의해 계산 할 수 있다.

$$\lambda_f = N_{stp} N_{tp} \Psi \quad (10)$$

여기서, N_{stp} 는 매극 매상당 슬롯수, N_{tp} 는 슬롯당 턴수를 나타낸다.

그러므로, 역기전력의 최대값은 각속도 ω_n 과 쇄교자속의 곱으로 표현되고, 이는 식(11)과 같다.

$$E_{max} = \omega \lambda_f \quad (11)$$

그림 3(a)는 70000 rpm에서 계산된 역기전력의 크기를 나타내며, 그림 3(b)는 속도에 대한 역기전력 변화를 나타내며, 해석결과는 실험 및 유한요소해석치와 잘 일치함을 보인다.

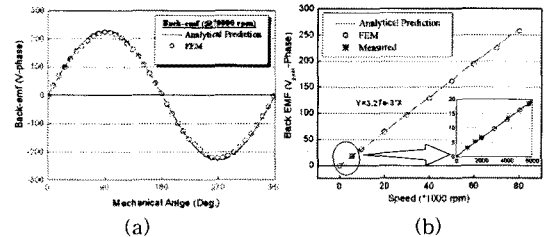


그림 3. 설계된 전동기의 역기전력 해석결과 (@70krpm)

3.3 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 소프트웨어인 XLrotor(엑셀로터)를 사용하였다. XLrotor는 타 프로그램들에 비해 모델링이 간편하고, 치수의 입력 등이 용이하며, 계산시간이 매우 빠른 장점을 갖는다. 그림 4는 회전자 동적 거동 해석을 위한 모델링을 나타낸다. 회전자 조립체의 전체 축방향 길이는 245.5mm 이고, 영구자석 영역의 축방향 길이는 80mm 이다. 그림 5는 베어링 강성(Bearing Stiffness)의 변화에 따른 위험속도(Critical Speed)의 변화를 나타낸다. 그림 6(a)-(b)는 각각 회전자 동적 거동 해석에 의한 Cornical Mode와 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.

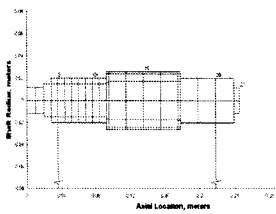


그림 4. 회전자의 동특성 모델링 따른 회전자 위험속도의 변화

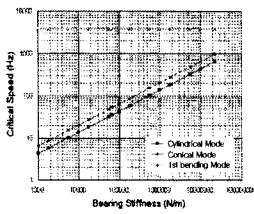


그림 5. 베어링 강성에 따른 회전자 위험속도의 변화

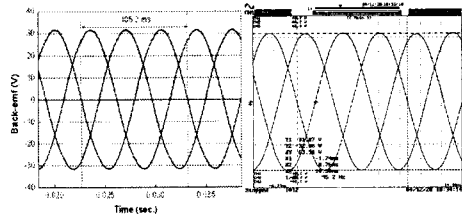
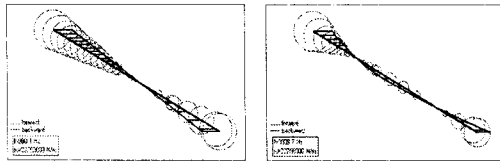


그림 9. 역기전력 특성 해석 결과 (5700 rpm)



(a) Cornical Mode (b) 1-st Bending Mode
그림 6. 모드 형상

4. 초고속 BLDC 전동기의 시제품 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, 역지기움을 하였다. 그림 7(a)는 제작된 회전자 조립체를 보여준다.

고정자 코어는 0.15mm의 박강판의 기계적 강도가 낮은 것을 감안하여 양 단부에는 0.35mm의 일반 규소강판 10장을 적층하여 단부에서의 기계적 고정을 피하여 적층하였으며, 적층후 권선작업은 수작업으로 시행하였다. 그림 7(b)는 권선 작업 및 홀센서의 부착이 완료된 고정자 조립체를 보여준다.

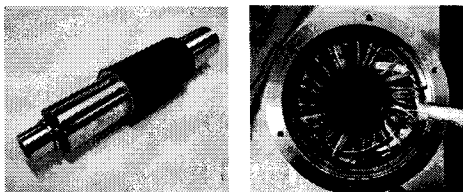


그림 7. 영구자석 회전자 및 고정자 조립체

본 연구에서는 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 8은 고속 IGBT 소자를 갖는 3상 전파방식 120° 도통형 인버터의 구성도를 나타낸다.

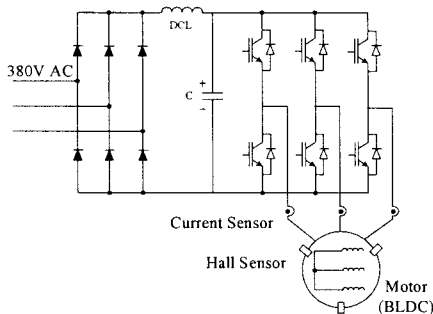


그림 8. 3상 인버터 구성도

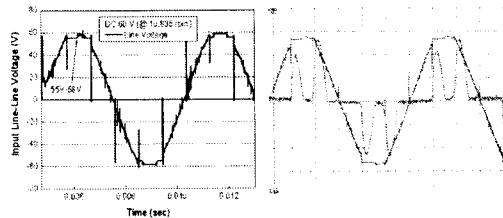


그림 10. 입력 전압 특성 해석 결과 (10835 rpm)

그림 9와 그림 10은 역기전력 특성 및 DC 링크 전압 60V에서 유한요소해석에 의한 입력전압 시뮬레이션 및 시험 파형을 나타내며, 설계된 모델의 해석 결과가 실험 결과가 잘 일치함을 확인 할 수 있다.

5. 결 론

본 논문에서는 터보 압축기 시스템의 핵심 요소기술인 초고속 BLDC 전동기에 관하여 공간고조파법 및 등가자기회로법을 이용한 설계 기법을 제시하였다. 설계 모델은, 시스템에서 요구되는 50kW, 80000rpm 급 초고속 전동기의 정격속도 및 정격부하상태에서 설계사양을 만족시킬 수 있도록 특성방정식을 바탕으로 설계를 하였다. 또한, 기본 설계시 초고속 운전상태에서의 기계적 안정성을 고려하기 위하여 회전자의 동적해석을 수행하여 결과를 제시하였다.

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

[참 고 문 헌]

- [1] 이성호, 자기회로 구성조건에 따른 직선형 전자기 에너지 변환기의 정특성 해석, 박사학위논문, 충남대학교, 2003.
- [2] 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.
- [3] J.R. Hendershot Jr, TJE Miller, Design of Brushless Permanent Magnet Motors, Magna Physics Publishing and Clarendon Press·Oxford, 1994.
- [4] 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.