

초고속 소형 BLDC 전동기의 설계

장석명, 조한욱, 최장영, 유대준, 권정기, 최상규*
충남대학교, KIMM*

Design of the Small High-Speed BLDC Motor

Seok-Myeong Jang, Han-Wook Cho, Jang-Young Choi, Dae-Joon You, Jung-Ki Kwon, Sang-Kyu Choi*
Chungnam Nat'l Univ. KIMM*

Abstract - Recently, a high-speed motor has been generating a lot of attention due to its performance - more light, thin, short, compact than ordinary motors. This paper describes the design of the small high-speed BLDC motor with the ratings of 0.5HP and 70 000 rpm for industrial application such as machine tool. Simulation results are given, which show that motor efficiency of higher than 80%.

1. 서 론

최근 초고속 회전기 시스템은 산업 현장이나, 특수 목적용으로써 각광받는 한 분야중 하나이다. 특히, 공작기계의 스핀들 구동용, 또는 터보 압축 펌프나 마이크로 터빈과 같은 고용량 소형 시스템에 필수적인 요소 기술이다. 이러한 초고속 회전기류 들은 기어가 필요없이 직접 구동 드라이브나 가스터빈 등에 접속되어 직접 초고속 회전을 얻는다. 따라서, 초고속 회전을 적용하는 시스템에서 소형 컴팩트화 및 비용의 절감 및 고효율화를 꾀할 수 있는 장점을 갖는다.

초고속 전동기 및 발전기에 관한 연구는 최근들어 더욱 활발히 진행되고 있는데, 요구되는 관련 기술들을 열거하면 다음과 같다.

- 1) 전력전자 회로의 비용 절감
- 2) 고성능 영구자석 및 저 철손 스틸
- 3) 고속 운전상태에서의 안정성
- 4) 고속에 적합한 베어링 및 윤활기법 개발
- 5) 설계 기술의 개발 및 시뮬레이션 기법 확립

그러나, 초고속 회전에 따른 회전자의 기계적인 스트레스나 초고주파 입력전원에 의한 철손증가, 제어 기술, 베어링, 방열과 냉각 등 전기적, 기계적 물성적으로 광범위한 문제가 야기되므로, 더욱 활발한 연구를 요구한다.

그동안에는 농형유도전동기가 견고성과 유지보수, 안정적 운전 등의 장점 때문에 각 분야 뿐만아니라 고속 회전기의 구동원으로도 많이 사용되어 왔다. 그러나 초고속 구동시 농형 알루미늄 바, 슬롯-치의 자기적 구조가 내구성 측면에서 적합하지 않다. 더구나 높은 주파수 전원에서 철손과 2차측 회전자 바의 동손에 의한 열이 크게 발생하므로 효율 및 역률 저하 등의 많은 문제점을 야기한다. 또한, 회전자의 구조가 간단하고, 내구성이 강한 릴럭턴스 형의 경우, 철손의 발생이 필연적이며, 소음 및 진동 등의 문제점으로 근본적 제약을 받는다. 최근, 회도류계 영구자석의 발달로, 구조가 간단하고, 컴팩트한 NdFeB 영구자석을 회전계자로 하는 브러시리스 기기가 수십만 rpm 까지의 초고속화에 가장 적합한 것으로 평가되는데, 고성능 영구자석의 이용으로 여자전력을 필요로 하지 않는 장점을 갖는다. 그러나 초고속 운전시 고정자의 철손 뿐만아니라 고정자의 슬롯-치 구조로 인한 코깅토크로 진동이 발생하며, 슬롯 리플에 의한 공극자속밀도의 고조파 성분은 영구자석과 이를 구속하는 도전

성 슬리브에 와전류를 발생시켜 매우 큰 손실을 발생한다. 또한 권선은 일반적으로 고정자 슬롯 내에 위치하는데, 초고속 전동기에서 회전자의 직경은 구조적으로 원심력에 강하도록 설계되므로 비교적 고정자 내반경이 작다. 따라서, 슬롯 개방폭이 비례적으로 줄어들게 되므로 권선 작업이 어려워 일반적으로 수작업이 이루어진다 [1].

본 논문에서는 0.5 HP급 70000 rpm의 정격출력 및 정격속도를 갖는 초고속 BLDC 전동기에 대하여, 초고속 회전에 따른 원심력에 충분히 견디는 구조를 갖는 영구자석 회전자 및 손실의 최소화를 위한 고정자를 설계하고, 시뮬레이션을 통하여 출력특성을 해석하였다.

2. 초고속 BLDC 전동기 설계

2.1 회전자 설계

영구자석을 이용한 BLDC 전동기는 자기회로를 구성하는 영구자석과 회전자의 형태에 따라 표면부착형 영구자석 전동기(Surface mounted permanent magnet motor : SPM)와 매입형 영구자석 전동기(Interior permanent magnet motor)로 분류된다[2]. 본 논문에서는 초고속 회전에 적합하도록 구조적으로 간단한 형태인 Ring Magnet를 갖는 SPM을 표 1과 같은 설계 요구자의 제약 사항에 따라 설계를 수행하였다.

요구되는 출력을 만족하는 초고속 BLDC 전동기의 초기 설계시 체적을 결정하기 위한 방법으로 회전자 체적당 토크 (TRV : Torque per Rotor Volume) 결정방법을 사용하였고, 용량이 비교적 작은 초고속전동기의 설계시

표 1. 초고속 BLDC 전동기의 설계요구 사항

항 목	사 양	항 목	사 양
정격출력	0.5 (HP)	정격속도	70,000 (rpm)
정격전압	50 (V)	상 수	3
구동방식	120° 도통형		

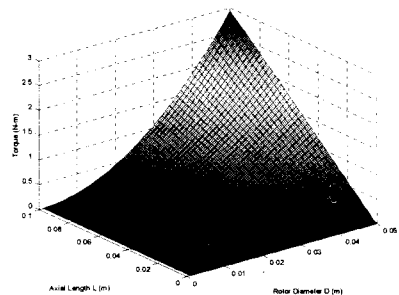


그림 1. 토크(T), 회전자 직경(D), 축방향길이(L)의 관계

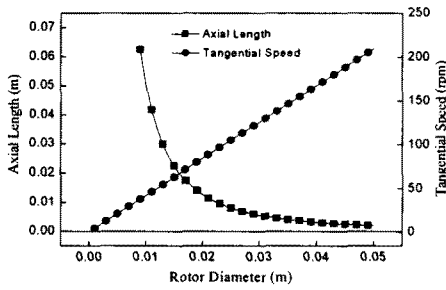


그림 2. 초기설계시 D, L 및 접선속도(@70000rpm)

의 경험치로, 약 15 정도의 TRV를 적용하였다. 여기서, TRV는 식(1)로 정의된다 [3].

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

여기서, D_r 은 회전자의 직경, L 은 회전자의 축방향 길이를 나타내며, 식 (1)에 의해 회전자의 기본 체적 ($D_r^2 L$)을 결정할 수 있다.

표 2. 회전자 설계 사양

항목	사양	항목	사양
슬리브 외경	15 (mm)	영구자석 외경	12 (mm)
축 외경	6.4 (mm)	슬리브 접선속도	62.8 (m/s)
영구자석 접선속도	50.3(m/s)	공극자속밀도	0.6 (T)

표 2는 TRV 체적 결정방법에 의해 설계된 초고속 BLDC 전동기의 회전자의 기계적 사양이다. 여기서, 슬리브 및 영구자석의 접선속도는 각각 62.8 m/s, 50.3 m/s 로, 구조적으로 안정된 설계치를 갖는다.

2.2 고정자 설계

고정된 DC 링크단의 전압에 의해, 설계 대상 BLDC 전동기에서 요구되는 무부하시 역기전력이 정해지게 된다. 이 때, 전기자가 회로적으로 개방된 상태에서 역기전력은 식(2)와 같이 표현될 수 있다.

$$E_{max} = N_m k_{w1} B_g L R_1 N_s \omega_n \quad (2)$$

여기서, N_m 은 극수, k_{w1} 은 권선계수(= $k_d k_p$), B_g 는 공극자속밀도의 최대값, L 은 고정자의 유효 축방향 길이, N_{turn} 은 상당 권선수(= $N_s N_{sp}$: N_s -슬롯당 권선수, N_{sp} -매극대상당 슬롯수) 그리고 ω_n 은 회전자의 동기속도이다. 요구되는 역기전력이 E_{ref} 라 하면 슬롯당 권선수 N_s 는 식(3)와 같이 계산될 수 있다.

$$N_s = \frac{E_{ref}}{N_m k_{w1} B_g L R_1 N_{sp} \omega_n} \quad (3)$$

식(3)에서 E_{ref} 를 만족하는 슬롯당 권선수 N_s 는 계산된 값보다 큰 가장 가까운 정수이다. 그러므로, 상당 권선수 N_{turn} 은 식(4)와 같다.

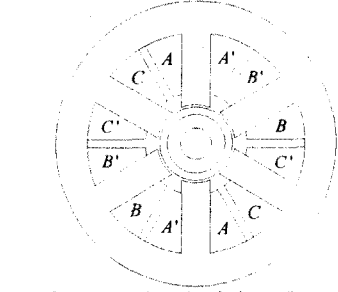


그림 3. 초고속 BLDC 전동기 설계 모델

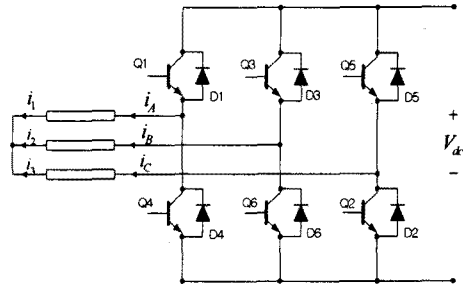


그림 4. 3상 전파방식 인버터 구성도

$$N_{turn} = N_s N_{sp} \quad (4)$$

그리고, 설정된 상당권선수 N_{turn} 에 의하여 기기의 역기전력 E_{max} 는 식(2)으로 계산안 되어야 한다.

그림 3은 설계된 초고속 BLDC 전동기의 단면을 나타낸다. 전동기의 특성상 요구되는 속도가 매우 높고 체적이 작으므로 와이어 커팅에 의한 고정자 코어의 제작 및 조립의 용이성을 고려하여 단순한 고정자의 형상을 선정하였다.

2.3 구동방식

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 4는 고속 IGBT 소자를 갖는 3상 전파방식 120° 도통형 인버터의 구성도를 나타낸다.

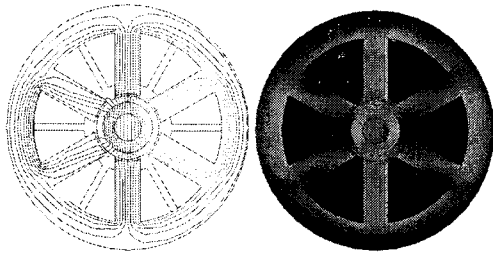
3. 특성 해석

3.1 자계 해석

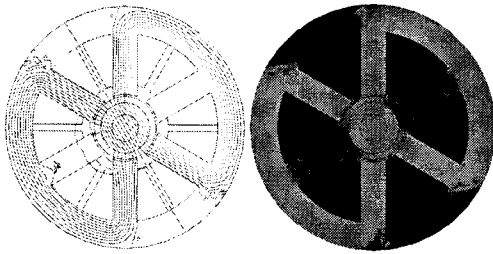
그림 5와 그림 6은 무부하시, 부하시의 등포텐셜 및 자속밀도의 분포를 나타낸다. 초기설계에서 전동기의 특성이 요구사항을 만족하게 되더라도, 치의 포화에 의한 철손의 증가로부터 효율감소 및 전동기의 온도상승에 관한 문제가 발생할 수 있다 [2]. 본 연구에서 설계된 BLDC 전동기의 치 자속밀도는 0.7 (T), 고정자 요크 자속밀도는 0.5 (T), 권선의 점적률은 40(%)가 되도록 치 폭 및 슬롯 단면적을 변경하여 설계과정을 수행하였다.

3.2 손실 해석

전동기에서 손실은 크게 동손과 철손으로 나눌 수 있고, 동손은 전류에 의한 저항손, 철손은 재질 자체의 자기력 특성에 의한 히스테리시스손과 와전류손으로 나눌 수 있다. 초고속 전동기에서는 슬롯-치 구조 및 전기자



(a)동포텐셜 (b)자속밀도
그림 5. 무부하시 자계분포



(a)동포텐셜 (b)자속밀도
그림 6. 부하시 자계분포

전류의 비정현적 특성에 의해 회전자의 도전성 재질-슬리브, 영구자석-에서 와전류 손실의 성분을 고려해야 하며, 기계적 손실로 존재하는 베어링 마찰손 및 풍손 또한 매우 중요하다.

3.3 출력 특성 해석

그림 7은 정격 운전시 전동기에 인가되는 상전압과 상전류의 파형을 나타내며, 정격 상전류는 약 7.3 Arms 이다. 한편, 본 연구에서 제시한 모델의 경우 직경방향으로 자화된 영구자석 회전자는 공극자속밀도가 정현적 특성을 가지므로, 공극 퍼미언스의 변화에 의한 코깅토크가 거의 발생하지 않게 되며, 본 설계 모델의 경우, 정격 토크의 약 3%에 해당하는 코깅토크가 발생하므로 전동기의 특성에 큰 영향을 미치지 못한다.

그림 8은 BLDC 전동기의 토크-속도, 토크-전류 특성을 나타낸 결과이다. 그림의 전류특성에서 알 수 있듯이 자기 포화가 거의 일어나지 않기 때문에 부하에 따른 선형성이 매우 우수함을 알 수 있다. 그림 9는 설계모델의 출력 및 효율 특성을 나타낸다. 정격 운전시 전동기의 최대 효율은 약 80.5%를 나타내고 있다.

4. 결 론

본 논문에서는 산업현장이나 특수 목적으로 고출력 소형 시스템에의 적용 특성이 매우 우수한 초고속 소형 BLDC 전동기의 설계 및 특성해석을 수행하였다. 전동기의 회전자는 영구자석 표면 부착형 SPM을 Ring Magnet 형태로 직경방향 자화를 가지며, 고정자는 집중 권을 행하여 설계 및 해석을 하였다. 본 연구 결과를 바탕으로 향후 시스템과의 결합된 구동특성 및 제작을 통한 연구가 지속되어야 할 것으로 사료된다.

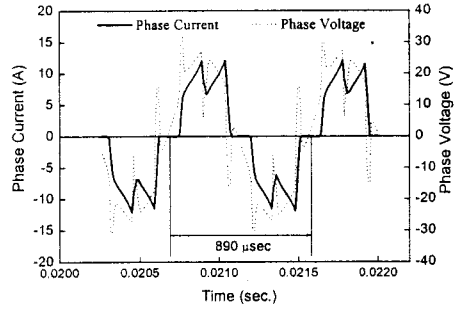


그림 7. 상전압 및 상전류 인가 파형

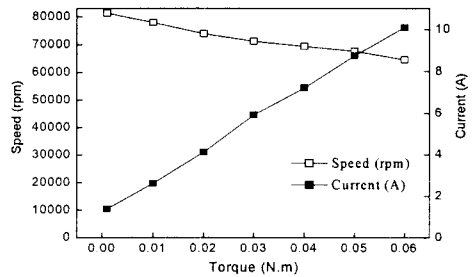


그림 8. 토크-속도, 토크-전류 특성

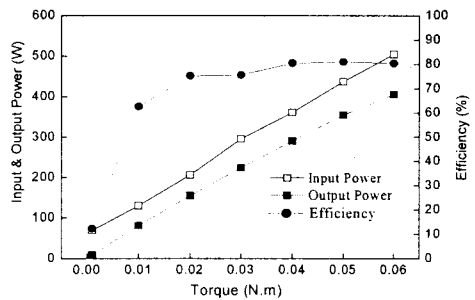


그림 9. 출력 및 효율 특성

[참 고 문 헌]

- [1] 장석명, 정상섭, 류동완, 최상규, "EMB용 전동발전기 선정을 위한 슬롯형과 슬롯리스 Ring wound형 영구자석 브러시리스 기기의 특성 비교," 대한전기학회논문지 50B-3-2, pp.107-114, 2001.
- [2] 허진, 정인성, 류세현, 김주환, 성하경, 강규홍, "Mild Hybrid 차량의 전동에컨용 고효율 BLDC Motor 개발", 대한전기학회 하계학술대회 논문집 B권, pp.923-935, 2004.
- [3] J.R.Hendershot Jr, TJE Miller, Design of brushless permanent-magnet motors, Oxford Magna Physics.
- [4] Duane C. Hanselman, Brushless permanent magnet motor design, McGraw-Hill, Inc.