

고속용 Axial-gap BLDC Motor 설계

김영관, 박진수
LG 전자(주) 리빙시스템 연구소

High Speed Axial-gap BLDC Motor Design

Young-Kwan Kim, Jin-Soo Park
LG Electronics Inc., Living System Lab.

Abstract - This paper describes a basic structure, analysis of characteristics and test method for high speed axial-gap BLDC motor.

The newly designed axial-gap BLDC motor has 2-stator disks with 3-rotor disks and is easy to increase power capacity by increasing the numbers of stator/rotor disks.

For high speed operating, the rotor is composed of light and strong strength material and has several separated magnets to reduce stress concentration by centrifugal force.

1. 서론

최근 영구자석의 발달로 출력비가 높은 Motor의 연구가 활발하게 진행되고 있다. 출력밀도가 높은 회전기기의 한가지 방법으로 Motor의 고속회전화가 요구되고 있으며, 고속용 Bearing의 개발 및 고속용 스위칭 소자들의 개발로 고속 Motor의 개발이 가능하게 되었다.

OA기기, Spindle 등에서 요구되는 30,000rpm 이상의 초고속 Motor의 설계를 위해서 본 논문에서는 2단의 Stator와 3단의 Rotor를 갖는 Axial-gap Motor를 설계하였다.

Stator는 Coreless구조로 하고, Rotor는 고속회전시의 Magnet의 견고한 유지/경량화 및 Coreless를 위해 비자성재의 고강도 알루미늄을 사용하였으며, 출력증가를 위해서 Stator 및 Rotor의 단수를 늘릴수 있는 구조로 설계하였다.

2. 본론

2.1 Motor의 구조

Motor의 구조는 그림 1과 같다.

1) Stator

Stator는 2개의 Coreless round disk type으로 권선을 Disk에 Molding하여 고정시키고, 조립 및 분해를 위하여 2분할 구조로 설계하였다.

2) Rotor

Rotor는 3개의 Round disk로 구성되어 있으며, Disk에는 착자된 12개의 Magnet를 원주방

향으로 등간격 배치 및 압입을 실시하여, 영구자석의 원심력에 의한 응력집중을 완화하여 Disk의 파괴방지 및 Operating speed limit를 향상시키고, Rotor의 경량화 및 강도를 고려하여 알루미늄 합금을 사용하였다.

3) 자기회로 구성

자기회로는 Rotor disk에 매립된 Axial방향으로 磁化된 영구자석과 Stator coil 및 Rotor disk의 양측면에 부착된 Back yoke plate로 구성되는데 일반 Cylindrical type의 Motor는 Radial flux path를 구성하는데 비해 Axial flux path를 구성한다. Stator가 Coreless구조이며, 공극이 크기 때문에 공극자속 밀도를 유지하기 위하여 잔류자속밀도가 큰 Nd-Fe-B(Br : 1.1[T], (BH)max : 218kJ/m³)를 사용하였다.

4) Bearing

Bearing은 고속용에 적합한 자기윤활 Type의 소형정밀 Ball bearing을 사용하였다.

5) Balance weight

Rotor의 고속회전시 Rotor의 잔류 Unbalance response에 의한 진동을 최소화하기 위해 그림 1)의 Balance weight를 이용하여 양면 Balancing 및 Dynamic balancing이 요구된다.

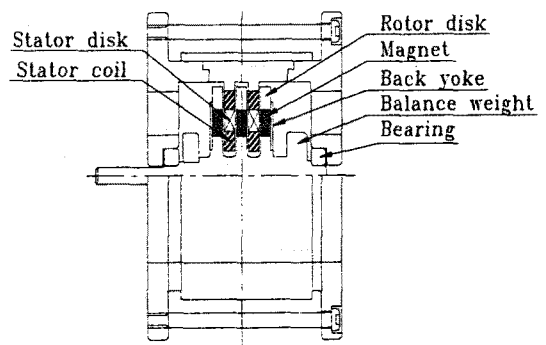


그림 1. Motor의 구조
Fig 1. Structure of Motor

2.2 Axial-gap Motor의 설계

2.2.1 구조설계시 고려사항

Motor의 구조설계시 다음과 같은 사항을 고려하여 설계하여야 한다.

1) Rotor disk의 재질선정은 Magnet를 고정하여 유지할 뿐만 아니라, Rotor의 경량화 및 Critical speed의 증가, Inertia의 감소를 위하여 경량의 고강도 재질을 선정해야 한다. 표 1에 Rotor disk의 재질로 사용가능한 재료의 중량비교를 나타내었다.

표 1. Rotor disk 용 재질의 중량비교

재 질	중 량
Steel	100%
Aluminum	45%
FRP	31%

*Steel 중량(100%)대비 비교중량임.

2) Rotor 회전축계의 설계時에는 공진에 의한 Rotor의 파괴현상을 방지하기 위하여 고유진동 해석에 의한 회전축계의 1차 Critical speed가 Motor의 사용 회전수와 20%이상 격리되도록 설계하여야 한다. 금번 설계의 회전축계의 1차 Critical speed는 60,000rpm으로 48,000rpm까지의 Operating이 가능하기 때문에 목표로하는 30,000rpm까지 충분히 사용 가능하다.

2.2.2 전기설계시 고려사항

고출력밀도 달성을 위한 고속용의 Axial-gap Motor를 설계하는 경우, 종래의 Cylindrical Motor와 자기회로 구성이 전혀 다르기 때문에 종래의 설계 방식은 적용할 수 없으며 또한, Stator 코일은 Air gap winding이기 때문에 공극 및 누설자속이 크게되어 자속분포를 정확하게 파악하는 것이 곤란하다. 또한, 자속분포는 3차원적으로 되기 때문에 가정자로법을 이용한 자기회로에 의한 설계는 곤란하게 된다. 그러므로 다음과 같은 방법으로 모터의 기본특성 검토, 전기설계를 실시하였다.

1) Motor 출력

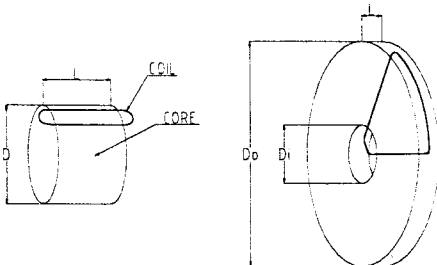


그림 2. 축방향 및 원통형 Motor
Fig 2. Axial & Cylindrical Motor

그림 2는 Axial flux 및 Radial flux Motor의 출력을 결정하는 주요 변수를 나타낸 것이다. Radial flux Motor의 경우, 주요 변수는 Rotor 외경 및 적층길이인 반면, Axial flux Motor는 토오크 발생시키는 유효 Rotor 외경 및 내경이다. 2단의 Stator disk로 구성되는 Axial-gap Motor의 출력은 다음 식과 같다.

$$P_d = 2 \cdot m \cdot E \cdot I \times 10^{-3} \text{ [kVA]} \quad (1)$$

$$E = \frac{z \cdot p \cdot n}{a} \times \phi \quad (2)$$

$$B = \frac{p \cdot \phi}{\frac{\pi}{4} \cdot (D_o^2 - D_i^2)} \text{ [Wb/m}^2\text{]} \quad (3)$$

$$A = \frac{(2 \cdot m \cdot z \cdot D)/a}{\frac{\pi}{2} \cdot (D_o + D_i)} \text{ [A/m]} \quad (4)$$

여기에서, m : 상수, E : e.m.f, I : 전류, z : 턴수, a : 병렬회로수, B : 비자기장하, A : 비전기장하를 나타낸다.

2) 유한요소법에 의한 자체해석

Rotor disk의 중심축으로부터 동일 반경상에 있는 영구자석의 중심을 통하는 원주방향면에서 절단하여 펼친 평면으로 모델을 치환하여 2차원 유한요소법에 의한 자체해석을 행하였다. 또한, 영구자석은 자기적으로 등가인 사각형의 영구자석으로 치환하여 각각 동일 반경상의 자석중심을 통과하는 평면으로 해석을 하고, 얻어진 자속량의 합에 의하여 총 자속량을 계산하였다.

자기벡터 포텐셜을 계변수로한 2차원 유한요소법의 지배방정식은 식 (5)와 같다.

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{1}{\mu} \frac{\partial A}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\frac{1}{\mu} \frac{\partial A}{\partial y} \right) = -J_0 - \nu_0 \left(\frac{\partial M_y}{\partial x} - \frac{\partial M_x}{\partial y} \right) \quad (5)$$

여기에서 A : 자기벡터 포텐셜, μ : 재료의 투자율, ν_0 : 공기의 자기저항률, J_0 : 강제 전류밀도, M_x, M_y : 자화 M의 x,y축 성분이다.

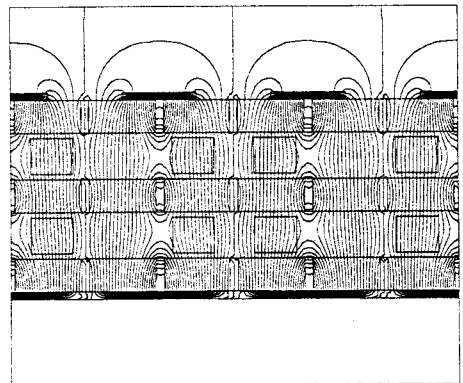


그림 3. 자속분포도
Fig 3. Flux Distribution

2.3 Test 방법 및 결과

고속용 Axial-gap BLDC Motor의 특성시험은 2相 중 1상을 Motor모드로, 다른 1상은 Generator Mode로 운전시키므로서 Motor 효율을 측정할 수 있다. 시험장치는 Motor의 입력 및 Generator의 출력을 측정하는 Powermeter와 Generator에 부하를 가할 수 있는 저항기 및 Controller로 구성되어 있다.

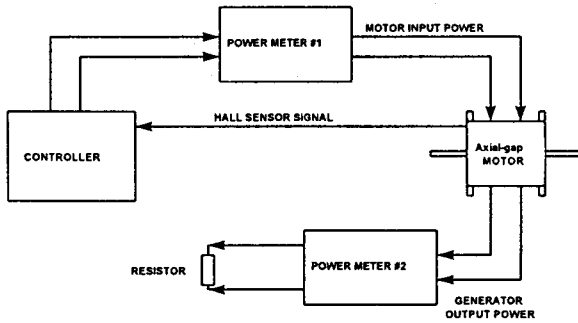


그림 4. 시험장치 구성도
Fig 4. Test Apparatus

(1) 무부하 시험

Motor에 부하를 가하지 않고 Motor를 정격 운전 속도까지 상승시키면서 각 속도마다 일정한 구간을 선정하여 이때의 전동기 입력값을 측정한다. 이러한 Motor의 무부하 입력값에서 동손을 뺀 값이 Motor의 무부하손(Air Friction & Bearing Loss)이 된다.

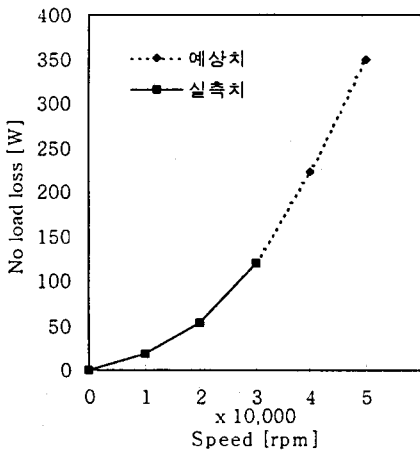


그림 5. 무부하 손실
Fig 5. No Load Loss

(2) 부하 시험

Motor의 1상에는 Controller 전원을 인가하여 Motor를 구동시키고, 다른 1상은 저항 부하를 가해 준다. 이때 각 상의 입력 및 출력을 측정한다.

(3) Motor 효율 산정

$$\eta_M = \frac{P_{G \text{ out}} + W_{G \text{ CO}} + \frac{P_{NL}}{2}}{P_{M \text{ in}}} \times 100 [\%]$$

$P_{G \text{ out}}$: Generator 출력 [W]
 $W_{G \text{ CO}}$: Generator 동손 [W]
 P_{NL} : 무부하 손실 [W]
 $P_{M \text{ in}}$: Motor 입력 [W]

2.4 시작기 모델

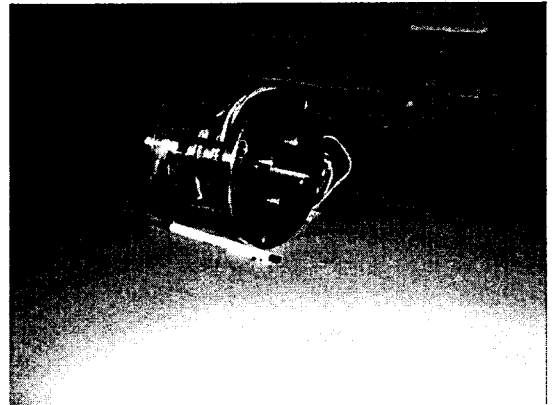


그림 6. Axial-gap Motor
Fig 6. Axial-gap Motor

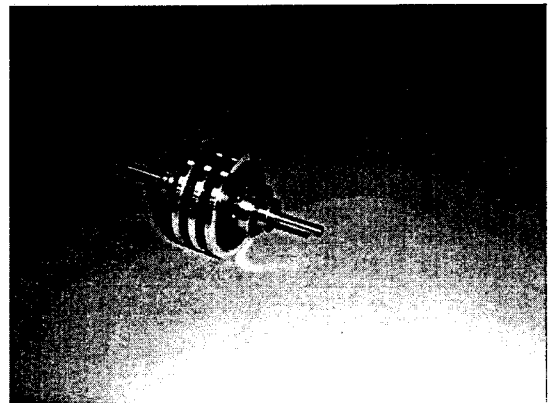


그림 7. Rotor disk
Fig 7. Rotor disk

3. 결 론

본 논문에서는 고속용 Axial-gap Motor의 설계, 해석 및 제작, 시험을 통하여 고속회전시 내원심력 등의 특성이 우수하여 설계 수준의 타당성을 확인 하였으며, 향후, 초고속 회전에서의 실기시험을 반복하여 고속시 특성시험이 지속되어야 한다.

(참 고 문 헌)

- [1] T. J. E. Miller, "Brushless Permanent-Magnet and Reluctance Motor Drives", CLARENDON PRESS, 1989
- [2] 堺 和人, "FRPで構成された永久磁石モータの解析と特性", 日本電氣學會論文誌 D, RM-93-77, 1993