

AFPM brushless 직류전동기 설계

공정식 오철수

경북대학교 전기공학과

Design of AFPM brushless DC Motor

Jeong-Sik Kong Chul-Soo Oh

Dept. of Electrical Eng. Kyungpook Nat. Univ.

Abstract

This paper is dealing with the slotless AFPM(Axial Flux Permanent Magnet) Brushless Motor. It has been reported that AFPM brushless DC motor have high efficiency and high energy density than radial flux permanent brushless DC motor. AFPM brushless DC motor finds its application of electric vehicles. In this paper, small AFPM brushless DC motor was designed using the ferrite permanent magnet. For this design, magnet of rotor, stator dimension and stator winding parameters has been studied and prototype AFPM motor has been assembled and motor speed, torque and efficiency are investigated.

1. 서론

현재 소용량의 전동기는 대부분 단상유도전동기 또는 직류전동기가 사용되고 있으며, 현재 brushless 직류전동기는 제어용과 같은 특수한 목적으로 사용되고 있다. 그러나 이러한 brushless 직류전동기는 단상유도전동기나 소형 직류전동기에 비하여 효율이 높으며, 단위체적당 에너지 밀도가 높은 장점을 가지고 있어, 앞으로 여러 분야에 이용될 수 있을 것으로 생각된다.

영구자석 여자 방식을 채용하고 있는 brushless 직류전동기는 전동기의 자로형성에 따라 radial field 형과 axial field 형의 두 가지로 구분되는데, axial field 형은 공극에서의 자속 방향이 전동기의 기계축과 평행하게 형성되는 것을 말한다. 이러한 AFPM(axial field permanent magnet) brushless 직류전동기는 토크 대 관성비가 작아 제어용으로 적합할 뿐 아니라, 고에너지 밀도를 갖도록 설계가 가능하며, 전동기의 효율적인 냉각 및 형태상 Slim 형으로 제작이 가능하다는 장점을 가지고 있다. 또한 현재 Nd-Fe-B와 같은 세로운 고에너지 영구자석의 개발로 인하여 비교적 큰 공극을 허용할 수 있게 되어 슬롯리스형으로의 제작도 가능하게 되었다.

AFPM brushless 직류전동기는 용량이 대형화되면서 차량 구동용으로의 적용 가능성에 대한 연구가 활발하게 진행되고 있다. 본 논문에서는 대용량의 AFPM brushless 직류전동기를 설계하기 위하여 소형의 prototype AFPM brushless 직류전동기를 제작하여 특성실험을 수행함으로서

차후의 AFPM brushless 직류전동기 설계에 대한 기본적 자료를 제시하고자 한다.

2. AFPM brushless 직류전동기 특성

prototype AFPM brushless 직류전동기의 구조는 그림1과 같다. 그림1 (a)는 전동기의 고정자 구조를 보여 주고 있는데, 하나의 고정자와 두개의 회전계자를 가지며, 고정자는 규소강판을 적층한 트로이달 코일을 사용하였다.

그림1 (b)는 이 전동기의 회전자 구조를 보여주고 있다. 회전자는 디스크형의 회전자 디스크에 영구자석을 부착한 회전계자 구조로 여기에 사용된 영구자석은 ceramic No. 8 이 사용되었으며, 영구자석의 자기적 특성은 $B_r = 0.38 - 0.41$, $H_c = 271 \text{ kA/m}$ 로 알려져 있다.

회전자에 부착하는 영구자석은 그림에서 보여주는 것처럼 사다리꼴을 사용하였다.

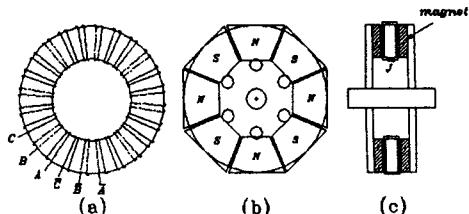


그림1. AFPM brushless 직류전동기의 고정자 및 회전자 구조

그림1 (c)는 AFPM brushless 직류전동기의 자로가 회전자 영구자석, 공극 그리고 고정자 철심을 통하여 형성된다는 것을 보여주며, AFPM brushless 직류전동기의 토크는 공극의 자속과 고정자 권선에 인가되는 electric loading J 의 상호작용에 의하여 생긴다. AFPM brushless 직류전동기의 유기기전력 및 토크는 식(1) 및 식(2)와 같이 나타난다.

$$E = 2\pi \omega N_p P K_p B_{ave} (R_o^2 - R_i^2) \quad (1)$$

$$T = 2\pi K_p B_{ave} J R_i (R_o^2 - R_i^2) \quad (2)$$

p : 전동기극수

ω_s : 전동기회전각속도

N_p : 상당극당권선수

K_p : 고정자권선과 영구자석에 의한 쇄교자속비

B_{ave} : 공극의 평균자속밀도

J : 고정자내경에서 권선의 electric loading

R_i : 고정자내경

R_o : 고정자외경

위식(2)는 출력토크가 공극의 평균자속밀도, 고정자전류에 의한 electric loading J , 고정자코어의 외경 및 내경에 의해 결정됨을 보여준다. 식(2)는 고정자외경에 대한 내경의 비 K_r 을 도입함으로서 식(3)과 같이 나타낼 수 있으며, 식에서 출력토크를 최대로 하기 위한 K_r 의 값은 $1/\sqrt{3}$ 이 된다.

$$T = 2\pi K_p B_{ave} J (K_r - K_r^3) R_o^3 \quad (3)$$

따라서 고정자외경이 결정되면 최대토크는 평균자속밀도 B_{ave} 와 electric loading J 의 함수로 나타나고, 이 두 변수는 도체의 직경에 따라 결정되며, 따라서 도체의 직경을 결정하면 전동기최대토크는 허용 electric loading에 의해 결정된다고 볼 수 있다. K_p 는 유기기전력의 과형에서 알 수 있듯이 최대 0.67 정도가 된다.

prototype AFPM brushless 직류전동기의 고정자형태는 슬롯리스형으로 자속밀도는 공극크기와 영구자석의 길이 및 영구자석의 면적에 의해 결정된다. 또한 공극은 도체의 직경[d]과 도체절연물의 두께[c], 기계적회전을 위해 필요한 공극의 합에 의해 결정된다. 따라서 이 전동기에서 공극의 자속밀도 B_g 는 아래식(4)과 같이 나타난다

3. Prototype AFPM brushless 직류전동기 설계

prototype AFPM brushless 직류전동기의 고정자구조는 트로이달코어에 3상권선을 감아 구성되며, 이권선을 Y

$$B_g = \frac{B_r}{1 + \frac{\mu_r L_g}{L_m}} \quad (4)$$

B_r : 영구자석의 자류자속밀도

L_g : 공극의길이

L_m : 영구자석외두께

결선하여 사용하였다. 전동기의 고정자는 electric loading J 를 증가시키기 위해 2층권으로 구성하였다. 이는 공극의 자속을 감소시키나 electric loading J 가 증가하여 전체적으로 토크는 증가한다.

AFPM brushless 직류전동기의 손실은 고정자코어의 철손과 와류손 그리고 기계손 및 코일의동손으로 구분할 수 있는데, 손실의 대부분이 고정자코일에서 발생하는 동손이 차지한다. 따라서 전동기의 효율을 증가시키기 위해서는 동손을 줄이는 것이 필수적이며, 동손은 전동기의 운도를 상승시켜 고정자코일의 electric loading J 가 제한되고 이에 따라 전동기의 출력이 제한된다.

아래 표1에 prototype AFPM brushless 직류전동기의 구조적 및 전기적 사양을 나타내었다.

표 1. Prototype 전동기 사양

고정자 코어 외경	116 mm
고정자 코어 내경	64 mm
고정자 코어 축방향 길이	9 mm
권선층수	2 layer
권선 직경	1 mm
극수	8 pole
상수	3 phase
영구자석두께	7 mm
정격상전압	18 V
정격전류	6.7 A
정격출력	220 W
정격토크	0.96 Nm
정격속도	2196
한상의 저항	0.21 Ω
한상의 인덕턴스	4.2 mH

4. 구동장치

AFPM brushless 직류전동기 구동실험을 위하여 3상전압형 인버터를 제작하였으며, 3상인버터의 스위칭소자로는 IRFP250 MOSFET를 이용하였으며, 위치검출용센서로는 포토인터럽트를 사용하였다. 포토인터럽트는 TLP 800을 사용하였으며, 이 포토인터럽트에서 발생된 위치신호를 조합하여 MOSFET를 구동하였으며, 120도 및 180도 동통형의 두 가지 신호를 발생시킬 수 있도록 구성하였다.

구동회로는 직류전압 0~50V, 상전압 0~30V의 가변전압을 얻을 수 있도록 제작하였다.

5. 실험 및 결과고찰

AFPM brushless 직류전동기의 특성시험을 위해 무부하 및 부하시험을 수행하였으며, 그림 2는 AFPM brushless 직류전동기 한상의 무부하시유기기전력의 과형을 보여주고 있다. 이 과형은 영구자석의 형태에 의해 결정되는 것으로서 실험적으로 고정자도체와 영구자석의 쇄교비 K_r 은 약 0.67이 됨을 확인할 수 있었다.

부하실험은 전동기 정격부하의 120%까지 인가하면서 실험하였다. 그림 3은 무부하시인가전압에 따른 전동기의 속도 특성을 보여주고 있다. 전동기회전속도는 인가전압에 따라 선형적으로 비례하여 직류전동기의 특성을 나타내고 있음을 보여주고 있다.

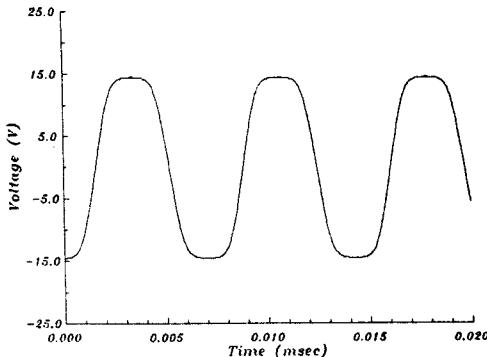


그림 2. AFPM brushless 직류전동기 한 상의
유기기전력의 파형

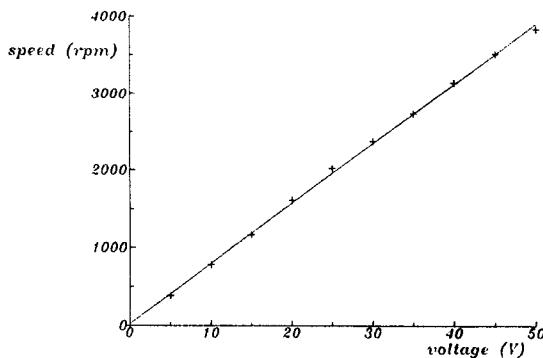


그림 3. 무부하시 인가전압에 따른 전동기의 속도 특성

그림 4는 전동기 상전압을 14 V, 16 V, 18 V로 인가하면서 속도에 대한 출력토크 특성을 나타내고 있다. 그림은 인가전압을 높일수록 같은 전류에서 전동기의 출력 토크가 증가하고 있음을 보여준다. 전동기 출력토크는 구동 전압을 높일수록 커지지만 기동전류가 커지는 문제점을 가지고 있다. 이것은 구동장치의 전류 한계에 영향을 받는다.

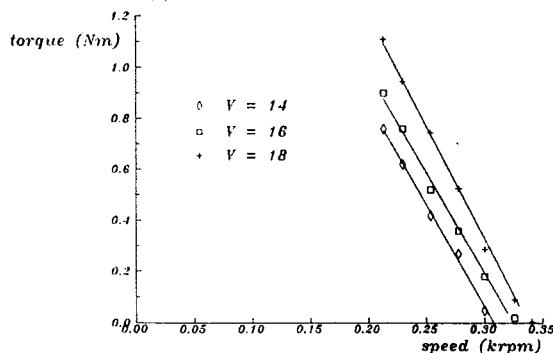


그림 4. 각 인가전압에서 속도에 대한 토크 특성

그림 5는 전동기의 부하에 따른 속도 및 토크, 효율 특성을 보여주고 있는 것으로서 전동기 출력은 정격부하에 대하여 약 220 [W]로 나타나며, 정격토크는 0.96 [Nm]이고, 정격속도는 2196 [rpm], 또 정격부하 전동기 효율은 약 82 [%] 정도를 얻을 수 있었고, 전동기의 최대 효율은 90 [%] 부하에서 83 [%] 정도로 측정되었다.

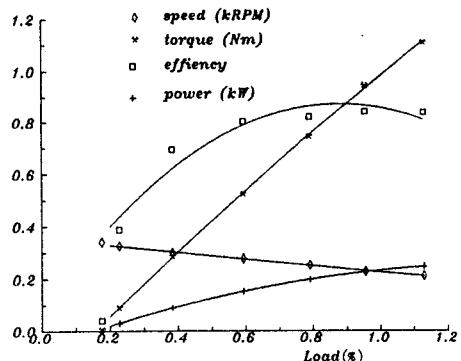


그림 5. 전동기 속도, 토크, 효율 및 출력 특성곡선

6. 결론

AFPM brushless 직류전동기를 설계하고, 그 특성을 살펴본 결과 다음과 같은 특성을 알 수 있었다.

1. 220W 전동기를 설계하였으며, 2층권이 단층권에 비하여 출력 토크가 증가하는 것을 알 수 있었다.

2. 전동기의 속도는 인가전압에 비례한다.

3. K_T 는 영구자석의 형태와 고정자권선의 분포에 따라 결정되는 상수로서 최대 약 0.67 정도를 얻을 수 있었다.

4. 인가전압에 따라 전동기의 출력토크가 증가하며, 구동장치 및 기동전류에 문제가 되지 않는 한 높은 전압으로 구동하는 것이 출력을 증가시킬 수 있다.

5. 설계된 전동기는 약 82 % 정도의 효율을 가지며, 대용량으로 제작할 시 효율은 더 증가할 것으로 생각된다.

AFPM brushless 직류전동기를 설계하여 제작하여 본 결과 실현실에서 제작하였기 때문에 약간의 손실을 감수할 수 밖에 없었으나 비교적 우수한 효율을 얻을 수 있었으며, 대용량으로 제작할 경우 상당히 우수한 특성을 나타낼 것으로 사료되어 차후 이에 대한 연구가 요구된다고 하겠다.

참고문헌

- E. Spooner, B. J. Chalmers, "Toroidally-Wound, Slotless, Axial-Flux, Permanent-magnet brushless dc motors", Proceedings of the international Conference on Electrical Machines, 1988, Vol III, pp. 81-86
- E. Spooner, B. J. Chalmers, "TORUS: A slotless, toroidal-stator, permanent-magnet generator", IEE Proceeding B, Vol. 139, No. 6, 1992.
- Chris C. Jensen, et. al., "A Low Loss Permanent Magnet Brushless dc Motor Utilizing Tape Wound Amorphous Iron", IEEE Trans. Vol. 28, NO. 3, 1992, pp.646-651
- Federico Caricchi, et. al., "Design and Construction of a Wheels-Directly-Coupled Axial-Flux PM Motor Prototype for EVs", IEEE Industry Applications Society 29th Annual Meeting, 1994, pp. 254-261.
- Z. Zhang, F. Profuno, A. Tenconi, "Axial-Flux Interior PM Synchronous Motor Torque Performance Analysis For Traction Drives" IPEC-Yokohama '95