

AFPM 전동기의 권선 형상에 따른 특성

김형길* 서영택** 공정식*** 오철수*
 경북대* 구미1대학** 서라벌대***

Characteristics of AFPM motor in variation of winding shape

Hyoung-Gil Kim* Young-Taek Seo** Jeong-Sik Kong*** Chul-Soo Oh*

*Dept. of Electrical Eng. Kyungpook Nat. Univ **Kumi 1 College ***Sorabol College

Abstract- An axial-flux permanent-magnet machine(AFPM) topology with coreless winding is proposed.

In the proposed AFPM configuration, the winding consists of a hexagon-shaped coils encapsulated in fiber-reinforced epoxy resin. Due to the lack of the iron core, the overall machine structure has high compactness and lightness. The simplified design calculation of the back emf was obtained. In this study, motor design was carried out using the software package Maxwell. This paper discusses the basic design of coil winding of AFPM motor. Experimental results were taken form a prototype machine rated 0.4 Nm, 2000 rpm.

은 회전축과 직각방향으로 발생하며, 전동기는 축과 직교하는 공극자속과 권선 전류의 작용에 의하여 토크가 발생하게 된다. 그러나 AFPM 전동기는 공극면이 회전축과 직교 하는 형태이며, 공극 내에는 축과 평행한 방향의 자속이 발생한다. 따라서 AFPM 전동기는 축과 평행한 방향의 자속과 권선의 전류에 의하여 토크가 발생한다.

그림 1 에 AFPM 전동기의 개략적인 구조를 나타내었다.

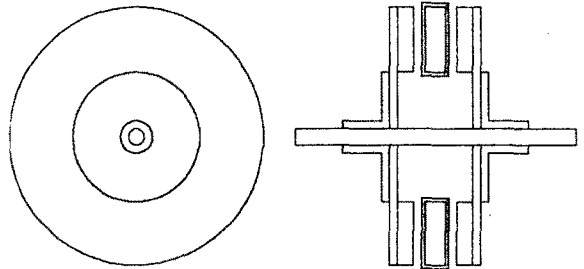


그림 1. 축방향자속형(AFPM)전동기

1. 서 론

자속축방향 영구자석 전동기(Axial Flux Permanent Magnet Motor)는 일반 전동기에 비하여 고에너지 밀도를 갖고 있으며, 구조적으로 짧은 축방향 길이를 가지는 Slim형 구조를 가지고 있다. 따라서 관성이 작고, 소형 경량화가 가능해 컴퓨터용 주변기기, 사무용기 등에 주로 사용되어 왔다. 일반적으로 전동기는 고정자 권선을 부착하고, 자속의 통로를 형성하는 고정자 철심이 있는 것이 보편적이나, 고정자 철심이 없는 코어리스형을 사용하기도 한다. 현재 AFPM 전동기의 고정자 권선의 형상은 트로이달형과 동심 환형코일의 두가지가 사용되고 있는데, 동심환형은 사다리꼴 형상을 사용하고 있다. 그러나 사다리꼴 형상의 경우 자극과 쇄교하는 자속은 크지만 불필요한 end winding이 커져 전동기의 동손을 증가 시켜, 전체적으로 전동기의 효율을 저하시키게 된다. 반면에 육각형권선의 장점은 코일의 저항이 사다리형보다 줄어들어서 손실이 적고, 효율이 높아 상대적으로 토크 발생이 용이하다. 본 논문에서는 이러한 점에 착안하여, 권선의 구조를 사다리꼴이 아닌 육각형으로 제작하여 전동기의 효율을 향상시킬 수 있는 방법에 대하여 연구하고자 한다. prototype 전동기를 제작하여 특성 실험과 2차원 유한요소해석법을 이용하여 AFPM 전동기의 공극자속 분포를 계산하고, 이를 통해 공극 자속의 해석 및 공극의 평균자속 밀도를 해석 하였다.

그림 1에서 AFPM 전동기의 회전자의 형태를 알 수 있다. 회전자는 디스크형의 원판에 영구자석이 부착된 형태로서, 고정자 양쪽 측면의 두 개의 회전자로 구성되어 있다. 고정자 코일의 양 측면을 이용하면 두 개의 회전자로 인하여 영구자석의 수는 증가되나 도체의 양쪽 측면을 동시에 이용할 수 있어 보다 고 효율의 전동기를 설계할 수 있다.

표 1은 실험을 위해 제작된 prototype 전동기의 사양을 나타낸다.

2. 본 론

2.1 AFPM 전동기의 구조

BLDC 전동기는 원주 방향 자속형 전동기(Radial Flux Permanent Magnet motor, RFPM motor)와 축방향 자속형 전동기(Axial Flux Permanent Magnet motor, AFPM motor)로 구분된다. RFPM 전동기는 회전축과 평행한 방향의 공극을 가지며, 공극내의 자속

표 1. Prototype 전동기의 사양

상수	3	[phase]
상당 권선의 층수	4	[layer]
극수	8	[pole]
코일 도체의 두께	0.3	[mm]
코일수	12	
코일당 턴수	7	[turn]
한상의 인덕턴스	0.1	[mH]
한상의 저항	0.95	[Ω]
고정자 외경	116	[mm]
고정자의 내경	58	[mm]
고정자의 두께	6	[mm]
회전자 디스크의 두께	3	[mm]
전체 축방향 길이	28	[mm]

그림 2(a)는 사다리꼴형 고정자 코일 형상을 나타내고 있으며, active side의 도체 길이보다 불필요한 end-winding이 상당히 크다. 또한 도체 길이도 길며, 코일 저항도 커진다.

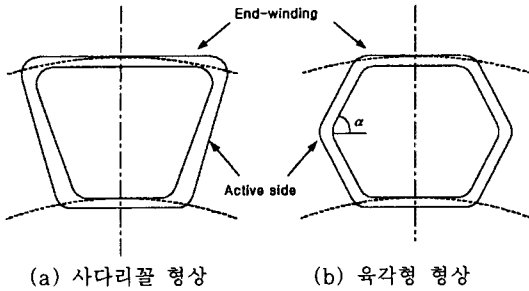


그림 2. 고정자 코일 형상

그림 2(b)는 고정자 코일의 형상을 육각형($\alpha=60^\circ$)으로 설계를 하므로써, 상대적으로 end-winding이 줄어들었다. active side의 도체길이가 길어졌고, 코일 저항도 10[%]정도 줄어 들었다. 각 코일의 턴 수는 7 턴이며, 절연 도체 대신 동판을 에칭하여 코일을 제작하였다. 그림 3, 4는 각 권선 형태의 1층 권선 형상과 고정자 권선 형상을 나타내고 있다.



그림 3. 고정자 권선의 육각형 형상

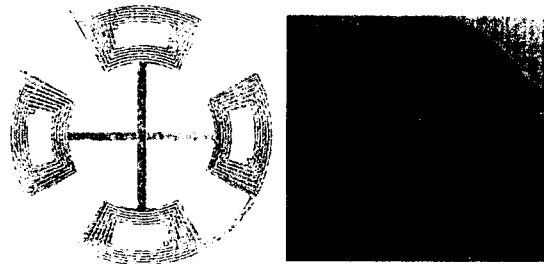


그림 4. 고정자 권선의 사다리꼴 형상

2.2 AFPM 전동기의 특성 방정식

AFPM 전동기의 특성은 일반적인 BLDC 전동기의 특성과 다르지 않다. 따라서 AFPM 전동기의 특성은

잘 알려진 BLDC 전동기의 일반적인 특성으로부터 알아낼 수 있다. 이때 영구자석의 극 피치는 전기각 180° 이며, 코일의 피치는 최소 120° 에서 240° 사이에 있게 된다. 권선의 유기기전력은 식(2.1)과 같이 나타낼 수 있다.

$$e_a = \omega \sum_{v=1}^7 \frac{d\psi_v}{d\theta} \quad (2.1)$$

여기서 ω 는 기계적인 회전각속도이며, θ 는 기계적 회전각, 그리고 ψ 는 코일과의 쇄교 자속을 나타낸다. 영구자석의 자속밀도가 원주 방향에 관계없이 공극내에서 일정하다면, 즉 영구자석의 프린징 효과나 영구자석 자화 과정의 불균일성을 무시할 수 있다면 AFPM 전동기의 권선당 유기기전력은 한 권선을 따라 공극 자속밀도를 적분함에 의해 식(2.2)을 구해진다.

$$e_{num} = 2 \omega \int_{R_i}^{R_o} B r dr \quad (2.2)$$

e_{num} 은 코일의 한 턴당 유기기전력이며, R_i 는 고정자의 내경, R_o 는 고정자의 외경, B 는 공극의 자속밀도를 나타낸다. 이와 같은 과정에서 AFPM 전동기 고정자 코일 전체의 평균 유기기전력 E 는 식 (2.3)과 같이 얻어진다.

$$E_{ave} = k_d \omega N_p p B_{ave} (R_o^2 - R_i^2) \quad (2.3)$$

여기서 k_d 는 권선계수이며, N_p 는 상당 극당 권선수, p 는 극수, B_{ave} 는 공극의 평균자속 밀도를 나타낸다. AFPM 전동기의 유기기전력 식(2.3)을 이용하여 토크를 구할 수 있다. 전동기에 전류가 흐르는 구간에 토크가 발생하므로 공극의 자속, 즉 유기기전력과 교차하는 전류 구간의 비에 따라 출력은 달라지게 된다. 이 구간에 대한 작용비 k_b 를 적용하여 식(2.4)로 쓸 수 있다. 120° 도통형의 경우 k_b 는 $2/3$ 의 값을 가진다.

$$T_{ave} = k_b k_d m N_p p B_{ave} I (R_o^2 - R_i^2) \quad (2.4)$$

2.3 FEM을 이용한 모델링

전동기 설계와 특성해석 시뮬레이션에 이용되는 프로그램은 여러 가지가 있지만 본 논문에서는 유한요소 해석법을 사용하였다. 전동기의 자속 해석에는 주로 2차원 해석이 주로 사용된다. 본 논문에 사용한 2차원 유한요소법은 Ansoft사의 Maxwell 2D 프로그램이다. 그림 5는 전동기의 자로를 나타낸다.

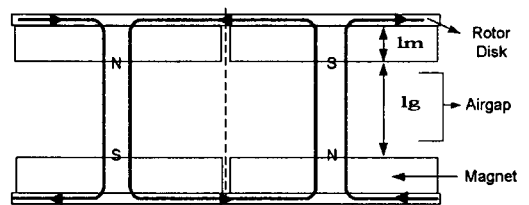


그림 5. AFPM 전동기의 자로

전동기 공극내의 자료를 해석한 결과 공극의 자속분포를 그림 6에 나타낸다.



그림 6. 공극내의 자속 분포

2.4 실험 결과

전동기의 무부하 특성 실험을 통하여 고정자 권선의 형상에 따른 유기기전력 특성을 측정하였다. 유기기전력은 전동기 회전속도를 300에서 3000rpm까지 변화시켜 가면서 그 파형과 실효값을 측정하였다. 그림 7은 전동기가 1800rpm으로 회전하고 있을 때의 A상 권선의 유기기전력파형을 나타내고 있다. 그림 8은 한상의 전류 파형을 나타낸다. 전동기의 부하 특성을 알기 위하여 입력 전압을 15V 인가로 두 코일형상을 비교하여 토크-속도 특성을 그림 9에 나타내었다. 그림 10는 AFPM 전동기의 토크 곡선이며, 육각형 권선의 토크 크기가 증가되었다. 그리고 전기각 60° 의 주기로 맥동 토크가 발생하고 있는 것을 알 수 있다.

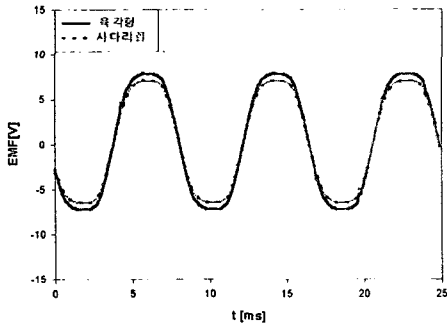


그림 7. 유기기전력의 파형 ($n=1,800$ rpm)

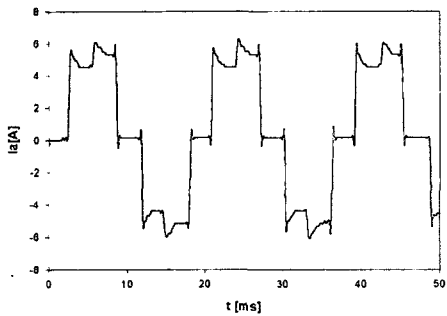


그림 8. 한상의 전류 파형

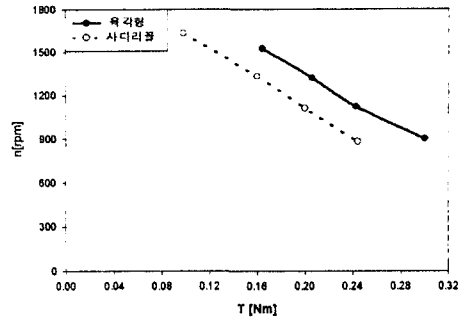


그림 9. 권선 형상에 따른 속도 대 토크 특성

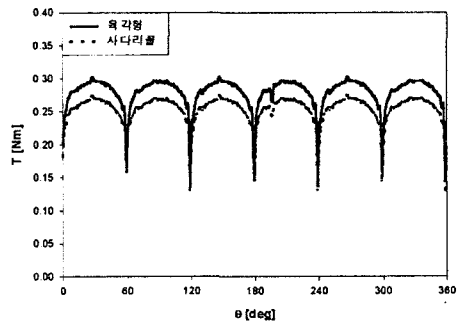


그림 10. AFPM 전동기의 토크 파형

3. 결론

본 논문에서는 prototype AFPM 전동기의 고정자 권선 형상을 사다리꼴형과 육각형 ($\alpha=60^\circ$)의 두 가지 형태로 제작하여 권선의 형상이 전동기의 효율 및 토크 특성에 영향을 준다는 것을 검증하였다. 실험 결과 육각형의 권선이 사다리꼴형 권선보다 더 큰 출력을 발생하였고, 효율도 상대적으로 더 높게 나타나는 것을 확인하였다. AFPM 전동기의 고정자 권선을 본 논문에서 제시한 것과 같이 육각형으로 제작하면 효율과 토크 특성을 개선할 수 있을 것으로 사료된다.

[참고 문헌]

- [1] J. R. Hendershot Jr, TJE Miller, "Design of Brushless Permanent Magnet Motors", Clarendon press. Oxford, pp. 1 ~ 25, 1994.
- [2] T. Kenjo, S. Nagamoti, "Permanent Magnet and Brushless DC Motors", Clarendon press. Oxford, pp. 59 ~ 78, 1985.
- [3] Duane C. Hanselman, "Brushless permanent magnet motor design", McGraw Hill Inc. pp. 41 ~ 60, 1994.
- [4] 공정식, 오철수, "AFPM 전동기의 특성 해석", 경북대학교 산업기술연구원지, 7, pp. 125-139, 1995.
- [5] 이정열, 공정식, 서영택, 오철수, "Slotless Axial Flux BLDC 전동기 설계", 경북대학교 전자기술연구원지, pp. 50-58, 1997.
- [6] Yurity N, Zhilichev, "Three-Dimensional Analytic Model of Permanent Magnet Axial Flux Machine", IEEE Transactions on Magnetics, Vol. 34, No. 6, pp. 3897 - 3901, 1998.