

저속-고토크용 AFPM 전동기의 특성해석

서영택* 김철호** 김형길*** 오철수**
 구미1대학* 경북대** 서영테크***

Characteristics Analysis of AFPM motor for low speed and high torque

Young-Taek Seo* Chul-Ho Kim** Hyoung-Gil Kim*** Chul-Soo Oh**

*Kumi College **Dept. of Electrical Eng. Kyungpook Nat. Univ ***Seo-Young Tech. Co.,Ltd.

Abstract - This paper presents the analysis, design and performance of an axial-flux permanent magnet(AFPM) motor with a core-less stator. Axial-flux permanent magnet motors prove to be the best candidate for application in electric vehicles(EVs) as direct drive wheel motors, as in comparison with conventional motors. They allow designs with higher compactness, lightness and efficiency. The paper discusses design and construction of a prototype motor, and reports experimental results achieved from laboratory tests.

그림 1은 AFPM 전동기의 개략적인 구조를 나타내었다.

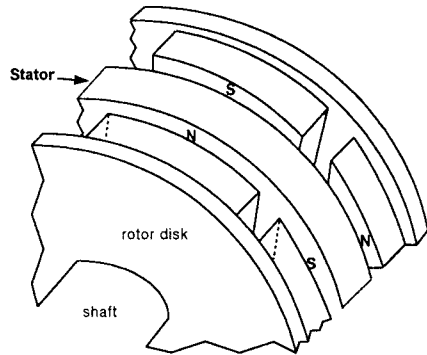


그림 1 AFPM 전동기의 형상

산업의 발달과 더불어 전동기 사용에 대한 수요는 급속히 증대되고 있는 실정이며, 전동기의 사용 목적 및 응용분야 또한 다양화 추세를 보이고 있다.[1] 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. 또한 바퀴 일체형으로 장착이 가능하므로 차체 중량을 최소화 가능하기 때문에, 최근에 AFPM 전동기를 전기자동차의 구동용 전동기로 사용하기 위한 연구가 활발히 진행되고 있다.[2] 이러한 BLDC 전동기의 용도는 출력 특성과 더불어 그 제어 특성이 전동기의 성능을 좌우하는 요인이 된다.[3]

AFPM 전동기의 회전자는 디스크형의 원판에 영구자석이 부착된 형태로서, 고정자 양쪽 측면의 두 개의 회전자로 구성 되어 있다. 고정자 코일의 양 측면을 이용하면 두 개의 회전자로 인하여 영구자석의 수는 증가되거나 도체의 양쪽 측면을 동시에 이용할 수 있어 보다 고 효율의 전동기를 설계할 수 있다[2]. 전동기의 자로는 영구자석의 재질, 영구자석의 배치, 극면적의 크기와 공극의 길이 등에 의하여 결정된다. 일반적으로 전동기는 고정자 권선을 부착하고, 자속의 통로를 형성하는 고정자 철심이 있는 것이 보편적이나, 본 논문에서는 고정자 철심없이 코어리스형을 사용하였다.

일반적으로 전동기의 출력 특성은 제어기의 성능과 전동기의 토크 특성 및 효율이 그 전동기의 출력 특성을 결정하는 중요한 요인이 된다. 최근에는 고 에너지 밀도를 가지는 회로류 자석류의 개발이 이러한 전동기의 응용분야의 확대를 가속화시키고 있다.[4]

표 1은 실험을 위해 제작된 Prototype 전동기의 사양을 나타낸다.

본 논문에서는 고정자를 중심으로 양쪽에 두 개의 회전자로 구성된 저속-고 토크용 AFPM 전동기를 시뮬레이션을 통해 특성을 파악하고 이를 바탕으로 Prototype 전동기를 제작하며, 속도가 낮은 영역에서의 전동기의 안정도를 향상시킬 수 있는 구동 드라이브를 설계한다.

표 1 Prototype 전동기의 사양

특히 전동기의 토크 출력 특성해석을 중점적으로 다루고 해석결과를 바탕으로 EVs 활용가능성을 이론적 고찰과 실험을 통해 검증하고자 한다.

상수	3	[phase]
상당 권선의 층수	2	[layer]
극수	20	[pole]
코일 도체의 직경	0.8	[mm]
코일수	60	
코일당 턴수	16	[turn]
한상의 인덕턴스	0.08	[mH]
한상의 저항	0.54	[Ω]
고정자 외경	204	[mm]
고정자의 내경	127	[mm]
고정자의 두께	8	[mm]
회전자 디스크의 두께	3	[mm]
전체 축방향 길이	30	[mm]

2. 본 론

2.1 AFPM 전동기의 구조

AFPM 전동기는 브러시리스형의 구조를 가지며 직류 입력을 스위칭하여 구동하게 된다. 이러한 전동기의 고정자를 중심으로 회전자가 배치되며 회전자에 영구자석이 사용되고 있으며, 전기자 권선은 고정자측에 권선되며 고정자 권선에 순차적으로 3상 입력을 인가함으로써 전동기를 구동시킬 수 있다.

2.2 AFPM 전동기의 특성 방정식

AFPM 전동기의 특성은 일반적인 브러시리스 전동기의 특성과 다르지 않다. 따라서 AFPM 전동기의 특성은 잘 알려진 Brushless 직류전동기의 일반적인 특성으로부터 알아낼 수 있다. 그림 2는 코어레스 AFPM 전동기의 고정자 코일의 일부를 나타내고 있다. 이때 영구자석의 극 피치는 전기각 180°이며, 코일의 피치는 최소 120°에서 최대 240° 사이에 있게 된다.

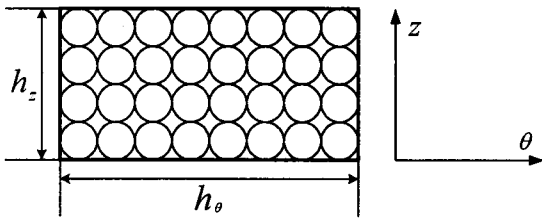


그림 2 θ -Z상에서 N개인 코일의 단면도

코어레스 전동기의 특성 방정식을 이용하여 힘을 계산할 수 있다. 고정자 코일의 배치에서 θ -Z상에서의 θ 와 Z 방향의 크기를 h_θ , h_z 라고 하면, 턴수가 N개인 코일의 단면도를 나타내고 있다. 실제로 힘을 받은 코일 부분을 r이라 하고, $r_{\max} - r_{\min}$ AFPM 전동기의 외경과 내경을 나타낸다. 자속밀도의 크기가 일정하다고 가정하고 코일이 받는 힘은 식(1)로 나타낼 수 있다.

$$dF_c = B_z(\theta, z, r) I dr \quad (1)$$

여기서 B_z 는 자속밀도의 z축 방향성분이다. I는 도체 전류, dr 는 도체의 미소 길이를 나타낸다. 도체가 받는 힘은 식(2)와 같다.

$$F_c = I \int_{r_{\min}}^{r_{\max}} B_z(\theta, z, r) dr \quad (2)$$

도체에 대한 토크는 식(3)와 같이 나타내고, 코일의 턴수에 대한 토크식은 식(4)와 같다.

$$T_c = I \int_{r_{\min}}^{r_{\max}} B_z(\theta, z, r) r dr \quad (3)$$

$$T_{coil} = I \sum_{k=1}^{N_c} B_{zk}(\theta, z, r) r dr \quad (4)$$

여기서 N_c 는 코일당 턴수를 나타낸다.

식(4)로부터 도체 단면의 유기기전력을 식(5)로 유도할 수 있다.

$$de_c = B_z(\theta, z, r) v dr \quad (5)$$

v 는 자장속의 도체의 상대 속도를 나타내고 있다.

식(5)로부터 도체와 코일의 유기기전력을 식(6.7)으로 나타낼 수 있다.

$$E_c = \omega_r \int_{r_{\min}}^{r_{\max}} B_z(\theta, z, r) r dr \quad (6)$$

$$E_c = \omega_r \sum_{k=1}^{N_c} B_{zk}(\theta, z, r) r dr \quad (7)$$

ω_r 은 도체의 각속도를 나타낸다.

2.3 FEM을 이용한 모델링

AFPM 전동기의 자기회로는 3차원의 형태로 해석이 요구되므로 해석이 복잡하여진다. 그림3에서 prototype AFPM 전동기의 단면을 유한요소법(FEM)으로 시뮬레이션 해본 결과 그림 4에서 처럼 전동기의 모든 부분에서 자로의 형성은 동일함을 알 수 있다. 따라서 한 부분의 자속의 경로만을 해석함으로써 자기회로의 해석이 가능하다. 이과정에서 공극에서 도체와 쇠교하지 못하고 인접한 영구자석 사이에서 생성되는 누설 자속과, 회전자 disc 간의 누설이 생성됨을 확인 하였다. 그림 6은 전동기의 축방향 자속 밀도로 최적의 극간 거리 L_{IP} 를 변화 시켜, 해석한 결과 극간거리 L_{IP} 가 2mm에서 누설이 적고 공극자속 밀도가 높은 극간 거리로 계산 되었다. 본 논문에 사용한 2차원 유한요소법은 Ansoft사의 Maxwell 2D 프로그램이다.

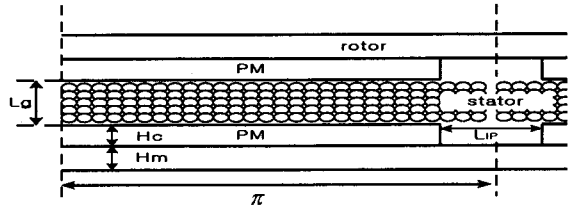


그림 3 Prototype AFPM 전동기의 단면

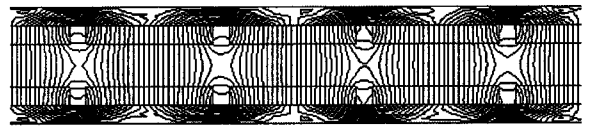


그림 4 FEM을 이용한 자속분포

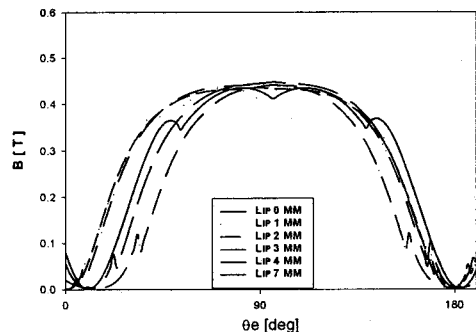


그림 5 극간 거리 L_{IP} 변화에 따른 축방향 자속 밀도

2.4 Prototype 전동기 제작과 실험

Axial Flux BLDC 전동기의 특성 해석을 위하여 본 연구에서 제안한 설계방법을 토대로 제작 하였다. 전동기는 코어리스형이며, disc형의 고정자와 회전자로 구성되어 있다. 그림 6은 시뮬레이션 결과에 의해 설계 제작된 극수 20극의 전동기 회전자를 나타내고 있으며, 그림 7은 회전자와 고정자가 조립된 전동기 본체를 나타내고 있다.

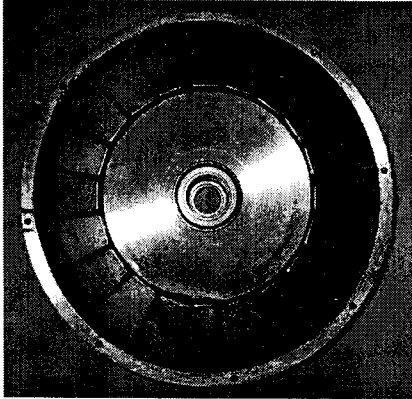


그림 6 Prototype AFPM 전동기의 회전자

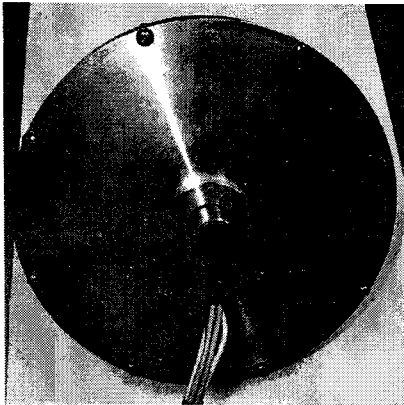


그림 7 Prototype AFPM 전동기의 외형

전동기의 구동을 위해 인버터시스템을 구성하였고, 인버터 시스템은 3상 PWM 전압형 인버터로 제작 하였다. 그림 8은 한상의 PWM 전류 파형을 나타낸다. 실험을 통하여 전동기 유기전력을 얻기 위해 회전속도를 0에서 1000rpm까지 변화시켜 가면서 그 파형과 실효 값을 측정 하였다. 그림 9에서는 전동기의 입력 전압을 20V-26V로 인가 하면서 속도에 대한 출력 토크의 특성을 나타내고 있다. 그림에서 인가전압을 높일수록 같은 속도에서 전동기의 출력 토크가 증가하고 있음을 보여준다. 전동기의 출력토크는 전동기의 냉각능력, 구동 장치의 전류 한계 등의 영향을 받는다. 실험 결과 전동기의 정격 출력은 200[W]로 전동기 효율은 약 87% 정도를 얻을 수 있었다.

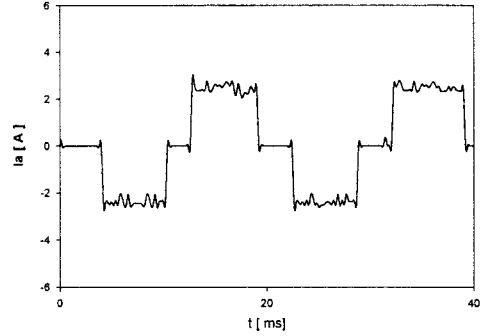


그림 8 한상의 PWM 전류 파형

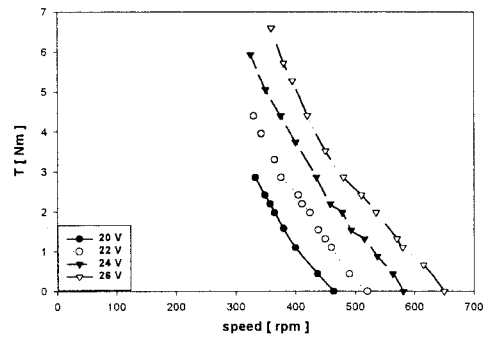


그림 9 전동기의 속도 대 토크 특성

3. 결 론

본 논문에서는 Prototype AFPM 전동기를 설계하고 특성 해석을 하기 위하여 자기 회로를 해석하고 전동기의 형태에 맞는 특성식을 유도 하였다. 전동기의 회전자 속도와 고정자의 전류를 제어 하므로써 저속에서도 높은 효율 특성을 얻을 수 있었고, 전동기의 최적설계를 통하여 단위 무게당 토크비가 향상되었다. 전동기의 축 방향 길이를 짧게 할수 있으므로 바퀴 일체형으로 장착이 가능한 EVs용 전동기에 적용 가능하며, 토크나 효율 면에서 좋은 특성을 얻을 수 있었다. 앞으로 지속적인 연구가 요구된다.

[참 고 문 헌]

- [1] J. R. Hendershot Jr, TJE Miller, " Design of Brushless Permanent - Magnet Motors", Clarendon press, Oxford, pp. 1 ~ 25, 1994.
- [2] 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.
- [3] 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.