

축 방향 자속 코어리스 전동기의 특성 해석

서영택* 공정식** 김철호*** 김형길**** 오철수***
 구미1대학* 서라벌대** 경북대*** (주)서영테크****

Characteristics Analysis of Axial Flux Permanent Magnet core-less motor

Young-Taek Seo* Jeong-Sik Kong** Chul-Ho Kim*** Hyoung-Gil Kim**** Chul-Soo Oh***
 *Kumi College **Sorabol College ***Dept.of Electrical Eng. Kyungpook N. Univ ****SeoYoungTech

Abstract - This paper deals with the design and characteristic analysis of a coreless an axial flux permanent magnet (AFPM) motor. 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 design with higher compactness, lightness and efficiency.

Recently, issues regarding environment and the diversification of dependence in oil are watched with keen interest. In this theses, through the simulation of AFPM for low and high torque which has stator in the center and two rotors each side, understand its specialty, with this, make a prototype motor and design drive which can enhance the motors stability in low speed. Especially, specialty of motors torque power output will be mainly talked and based on this, possibility of application in EVs will be inspected by the theoretical study and the test.

1. 서 론

산업의 발달과 더불어 전동기 사용에 대한 수요는 급속히 증대되고 있는 실정이며, 전동기의 사용 목적 및 응용 분야 또한 다양한 추세를 보이고 있다. [1] 최근 지구 환경문제와 석유 에너지에 대한 높은 의존도의 분산에 많은 관심이 집중되고 있는데, 그중 EVs(Electric Vehicles)는 환경 보존에 기여될 뿐만 아니라, 높은 에너지 효율로 많은 주목을 받고 있다. 영구자석 여자방식을 채용하고 있는 BLDC 전동기의 자로 형성에 따라 Radial flux형과 Axial flux형의 두가지로 구분되는데, Radial flux 형은 공극 단면이 축과 직교하는 방향으로 놓여져 이 공극에서 고정자 코일과 회전자의 자속의 상호작용으로 토크가 형성되나, Axial flux형은 공극단면이 축과 직교하므로 축과 평행한 방향의 자속에 의하여 전동기의 토크가 형성된다. [2] 축방향 자속 영구자석 전동기(Axial Flux Permanent Magnet Motor)는 일반 전동기에 비하여 고에너지 밀도를 갖고 있으며, 구조적으로 짧은 축방향 길이를 가지는 슬림형 구조를 가지고 있다. 또한 바퀴 일체형으로 장착이 가능하므로 전동기 자체 중량을 현저히 줄일 수 있다. 일반적으로 BLDC전동기는 출력 특성은 제어기의 성능과 전동기의 토크 특성 및 효율이 그 전동기의 특성을 결정하는 중요한 요인이 된다. [3]

최근에 AFPM전동기를 전기 자동차에 직접 구동용으로 사용하기 위한 연구가 활발히 진행되고 있다. 고 에너지 밀도를 가지는 희토류 자석류(Nd-Fe-B)의 개발이 이러한 전동기의 응용분야의 확대를 가속화시키고 있다. [4]-[5] 본 논문에서는 Core-less 고정자를 중심으

로 양쪽에 두 개의 회전자로 구성된 저속-고 토크용 AFPM전동기를 시뮬레이션을 통해 특성을 파악하고 이를 바탕으로 Prototype EVs(전기자전거, 스쿠터, 휠체어)전동기를 제작하며, 저속-고 토크용 전동기 구동 드라이브를 설계한다. AFPM 전동기의 토크 출력 특성 해석을 중점적으로 다루고 EVs 활용 가능성을 검증하고자 한다.

2. 본 론

2.1 AFPM core-less 전동기

AFPM 전동기는 브러시리스형의 구조를 가지며 직류 입력 전압을 스위칭하여 구동하게 된다. 전동기의 고정자를 중심으로 회전자가 배치되며 회전자에 영구자석이 사용되고 있으며, 전기자 권선은 고정자축에 권선된다. 일반적으로 고정자 권선에 순차적으로 3상중 2상 도통 방식으로 전동기를 구동 한다. BLDC 전동기는 정류작용을 위해 브러시와 정류자 대신에 회전자의 위치를 검출하는 소자와 이 위치 정보에 따라 인버터를 통해 전기자 권선에 전압이 인가된다. 위치 검출용 소자로는 홀센서, 엔코더등이 사용되며, 최근에 센서리스형 BLDC 전동기가 부분적으로 사용되고 있다. 그림 1은 축 방향 자속 (AFPM)코어리스 전동기의 개략적인 구조를 나타내고 있다.

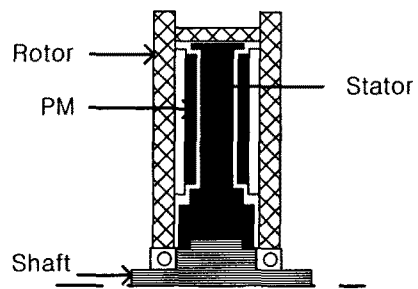


그림1.축 방향 자속 코어리스 전동기의 형상

AFPM 전동기의 회전자는 디스크형의 원판에 영구자석(PM)이 부착된 두 개의 회전자 disc는 팬의 역할을 하므로 전동기의 손실에 의하여 발생되는 열을 제거하기 알맞은 구조로 되어 있다. 전동기의 자로는 영구 자석의 재질, 배치, 극면적의 크기와 공극의 길이 등에 의하여 결정된다. 일반적으로 전동기는 고정자 권선을 부착하고, 자속의 통로를 형성하는 고정자 철심이 있는 것이 보편적이나, 코어를 사용하지 않으므로 발생되어지는 철손, cogging 토크를 줄일 수 있는 코어리스형을 사용하였다. 코어리스를 사용함으로써 체적당 코일 턴 수와 단위 무게당 토크의 비를 증가시킬 수 있는 효과가 있다.

표 1은 실험을 위해 제작된 Prototype 전동기의 사양을 나타낸다.

표 1. Prototype 전동기의 제원

구분	규격
정격출력	300 W
정격토크	5.7 Nm
단위 무게 당 토크의 비	1.62
상 수	3 상
극 수	20 극
상 당 저항	0.23 Ω
공극의 자속밀도	0.78 T
회전자 외경	208 mm
회전자 내경	130 mm
축 방향 길이	22 mm

2.2 특성 방정식

축 방향 자속 코어레스 전동기 특성은 일반적인 BLDC 전동기의 특성과 다르지 않다. 이때 영구자석의 극 피치는 전기각 180°이며, 코일의 피치는 최소 120°에서 240° 사이에 있게 된다. 코어레스 전동기의 특성 방정식을 이용하여 힘을 계산할 수 있다. 그림 2는 고정자 코일의 배치에서 θ-Z상에서 턴수가 N개인 코일의 단면도를 나타내고 있다.

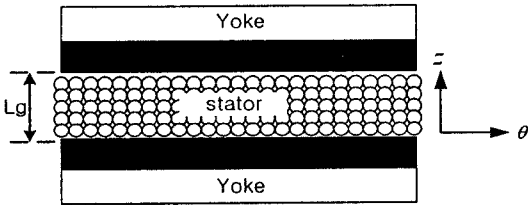


그림 2 θ-Z상에서 전동기 단면도

실제적으로 힘을 받은 코일 부분을 r이라 하고, R_o - R_i AFPM 전동기의 외경과 내경을 나타낸다. 자속밀도의 크기가 일정하다고 가정하고 코일이 받는 힘은 식 (1)로 나타낼 수 있다.

$$F_c = I \int_{R_i}^{R_o} B_z(\theta, z, r) dr \quad (1)$$

여기서 B_z 는 자속밀도의 z축 방향성분이다. I는 도체 전류, dr 는 도체의 미소 길이를 나타낸다. 도체에 대한 토크는 식 (2)와 같이 나타내고, 코일의 턴수에 대한 토크 식은 식 (3)과 같다.

$$T_c = I \int_{R_i}^{R_o} B_z(\theta, z, r) r dr \quad (2)$$

$$T_{coil} = I \sum_{k=1}^{N_c} \int_{R_i}^{R_o} B_{zk}(\theta, z, r) r dr \quad (3)$$

여기서 N_c 는 코일당 턴수를 나타낸다.

AFPM 전동기의 토크는 영구자석에 의하여 생성되는 공극의 자속과 고정자 권선에 흐르는 전류에 의한 고정자 내경에서의 electric loading J와의 상호작용에 의하여 생성된다. 따라서 고정자 철심의 양쪽 면에서 생성되는 전동기의 전체 토크는 식 (4)와 같이 주어진다.

$$T = 2\pi B_g J K_p R_i (R_o^2 - R_i^2) \quad (4)$$

여기서 J는 고정자 내경에서의 electric loading으로 식 (5)와 같이 주어진다.

$$J = \frac{NI_p}{2\pi R_i} \quad (5)$$

식 (5)로부터 출력 토크는 공극의 평균 자속밀도, 고정

자 권선에 의한 electric loading J, 고정자 외경, 내경에 의하여 결정됨을 알 수 있다. K_p 의 최대값은 각상의 권선을 Y-결선한 경우 120° 도통형 Inverter로 구동시 전류는 3상중 2상에만 흐르게 되므로 2/3으로 주어진다. 도체의 굵기를 선정하기 위해서는 전기자권선에 의한 열의 발생을 고려해야 한다. 동손에 의한 열발생은 고정자와 회전자 사이, 즉 공극에서의 공기의 흐름에 의해 제거된다. 발생한 열이 제거되는 비율은 권선의 두께와는 큰 관계가 없다. 그러나 열의 발생은 도체의 굵기와 전기장하, 자기장하에 의존한다. 전기자권선의 손실은 부하 전류의 흐름에 의한 동손과 권선에 흐르는 주자속에 의한 eddy loss으로 나눌수 있다. 이동손과 eddy loss은 식(6),(7)과 같이 주어진다.

$$P_J = \frac{C_J I_e^2}{d^2} \quad (6)$$

$$P_E = C_E B_p^2 d^2 \quad (7)$$

여기서 C_J 와 C_E 는 전동기의 극수, 속도, 온도 등에 의하여 주어지는 상수로 다음식과 같이 주어진다.

$$C_J = N_o k_r 8 \rho_o N_{ph} [(R_o - R_i) + D] / \pi \quad (8)$$

$$C_E = \frac{\omega_e^2}{32 \rho_o} \quad (9)$$

두 손실의 합 P_{cu} 를 최소로 하는 최적의 도체의 굵기는 B_p , I_e 를 최대로 하는 점에서 식 (7)와 같이 주어진다.

$$d_{opt} = \sqrt{\frac{P_{cu}}{2 C_E}} B_p \quad (10)$$

이 최적의 도체의 굵기 d_{opt} 는 Joule Loss와 와전류에 의한 자속은 고정되어 있으나, C_E 는 속도의 자속에 비례하여 변화한다. 따라서 고속의 경우는 와전류에 의한 손실이 Joule Loss에 의한 손실보다 더크다. 그러므로 도체의 굵기 d는 운전영역을 고려하여 적당한 선정이 필요하다

2.3 AFPM 코어레스 전동기제작과 특성실험

AFPM 코어레스 전동기의 자기 회로는 3차원의 형태로 해석이 요구되므로 해석이 복잡하여진다. 전동기의 단면을 2차원 유한요소법(FEM)으로 시뮬레이션을 통해 그림3에서 전동기의 모든 부분에서 자로의 형성은 동일함을 알 수 있다. 따라서 한부분의 자속의 경로만을 해석함으로써 자기회로의 해석이 가능하다. 이 과정에서 공극에서 도체와 쇄교하지 못하고 인접한 영구자석 사이에서 생성되는 누설자속과, 회전자 disc 간의 누설이 생성됨을 확인하였다. 그림4는 전동기의 축 방향 자속 밀도를 나타내고 있으며 본 논문에서 사용된 2차원 유한요소법(FEM)은 Ansoft사의 Maxwell 2D 프로그램이다.

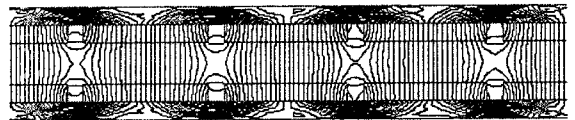


그림 3 FEM을 이용한 자속분포

본 연구에서 제안한 설계 방법을 토대로 저속 - 고토크 전동 차량용 스쿠터와 휠체어용 Prototype AFPM 코어레스 전동기를 제작하였다. 그림5는 전동기 특성 해석을 바탕으로 제작된 극수 20극의 전동기 회전자와 고정자를 나타내고 있다. 전동기 구동을 위해 3상 PWM (Pulse-Width-Modulated) 전압형 인버터를 사용하였다. 그림 6은 한상의 PWM 전류 파형을 나타내고, 실

험을 통하여 무부하속도 500rpm에서 상, 선간 유기기 전력을 그림7에 나타내고 있다. 그림8에서는 평지에서 전동차량용 스쿠터 토크 파형을 나타내고 있다. 그림9 Prototype AFPM 코어레스 전동 차량용 스쿠터 및 휠 체어를 나타내고 있다.

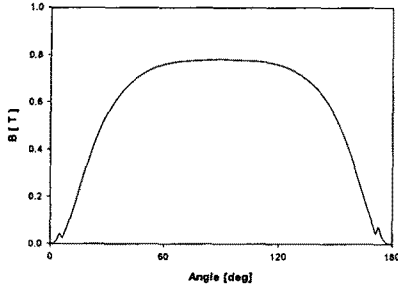


그림4 AFPM 코어레스 전동기의 공극 자속 밀도

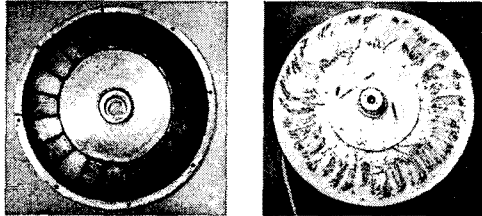


그림5 AFPM 코어레스 전동기의 회전자와 고정자

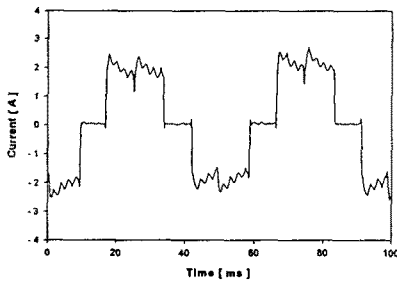


그림8 부하시 PWM 전류 파형

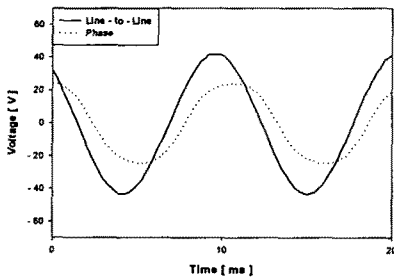


그림 7.상 전압과 선간 전압의 유기기전력 파형

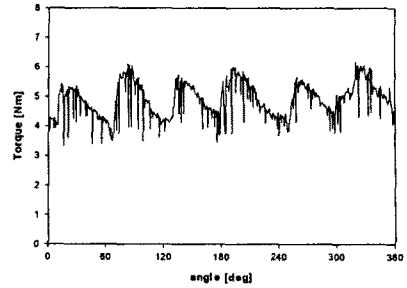


그림8 전동차량용 스쿠터 토크 파형(평지)

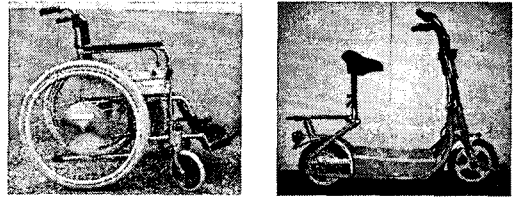


그림9. Prototype 전동 차량용 휠체어와 스쿠터

3. 결 론

본 논문에서는 Prototype AFPM 코어레스 전동기를 설계 및 특성 해석을 하기 위하여 자기 회로를 해석하고 전동기의 형태에 맞는 특성식을 유도하였다. 저속-고토크용 축 방향 자속 코어리스 전동기의 시뮬레이션을 통해 전동기의 특성을 파악하고 이를 바탕으로 Prototype EVs (스쿠터, 휠체어)전동기를 제작하였으며, 저속-고토크용 전동기 구동 드라이브를 설계 하였다. 특히 전동기의 토크 출력 특성 해석을 중점적으로 다루고 EVs 활용 가능성을 이론적 고찰과 실험을 통해 검증을 하였다. 전동기의 회전자 속도와 고정자의 전류를 제어함으로써 저속에서도 높은 효율 특성을 얻을 수 있었고, 전동기의 최적 설계를 통하여 단위 무게당 토크비가 향상되었다. 전동기의 축(Axial)방향 길이를 짧게 할 수 있으므로 바퀴 일체형으로 장착이 가능한 EVs용 전동기에 적용 가능하며, 토크(torque)나 효율면에서 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.
- (4) Duane C. Hanselman, " Brushless permanent - magnet motor design", McGraw-Hill Inc. pp. 41 ~ 60, 1994.1]
- (5) Profumo, F.; Zheng Zhang; Tenconi, A. "Axial flux machines drives: a new viable solution for electric cars" Industrial Electronics, Control, and Instrumentation, 1996., Proceedings of the 1996 IEEE IECON 22nd International Conference on , Vol. 1 , pp. 34 ~ 40 1996.