

양면 축방향 영구자석 전동기에서 자속위치 검출에 따른 특성

홍문환* 김철호* 이우석** 공정식*** 서영택**** 오철수*
*경북대 전기공학과, **부산정보대학 ***서라벌대학 ****구미1대학

Characteristic of Dual Air Gap AFPM along Flux Position Estimation

Mun-Hwan Hong* Chul-Ho Kim* Jeong-Sik Kong*** Young-Taek Seo**** Chul-Soo Oh*

Abstract - Axial Flux Permanent Magnet motor could widely be used for low speed and high torque applications. In this paper, to analyse the sensor positioning effect of AFPM motor which has a new concentric winding method and to calibrate the switching timing according to speed, prototype motor is manufactured.

As a result of experiment, advance angle from 30 degree to 45 degree of sensor position is more proper. So, this results can be used for design of sensor position to improve characteristic of the dual gap AFPM with coreless and slotless.

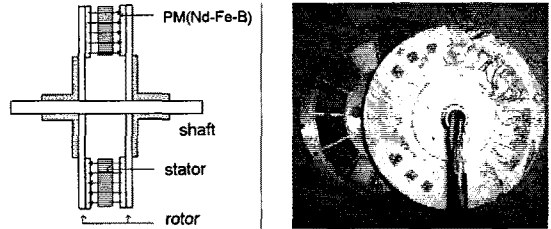


그림 1. AFPM 전동기의 구조와 Prototype

1. 서 론

BLDC의 한 종류인 자속 축방향 영구자석 전동기(AFPM motor, Axial Flux Permanent Magnet motor)는 일반 전동기에 비해 단위 체적 당 출력이 높으며 큰 직경의 다극기로 제작이 가능함으로써 저속 고토크 특성을 가진다. 그리고 구조적으로 짧은 축방향 길이를 가지는 Slim 형이므로 최근 FDD(Floppy Disk Drive), HDD(Hard Disk Driver), CD(Compact Disk)등에 적용되고 있다. 최근에는 전기 자전거, 휠체어에서 전기자동차에 이르기까지 적용에 대한 연구가 활발히 진행되고 있다. [1][2]

본 논문에서는 Coreless, Slotless의 양면(dual air gap) 새로운 동심환형 권선배열로한 AFPM을 Prototype으로 제작하여 특성해석을 한다. 이때 BLDC를 구동하는데 중요한 정보가 되는 자속위치를 포토 센서나 엔코더, 홀센서등을 통해 검출하게 된다. 여기서는 홀센서를 적용하여 이를 취부하는 위치에 따라 전동기의 출력특성을 파악하고 이를 설계에 반영하고자 한다.

2. 본 론

2.1 AFPM 전동기의 구조 및 특성방정식

BLDC 전동기는 자속 원주방향 전동기(RFPM motor)와 자속 축방향 전동기(AFPM motor)로 구분된다. 발생토크는 RFPM 전동기인 경우 축과 직교하는 공극 자속과 권선 전류의 작용에 의해 나타나는 반면 AFPM 전동기인 경우 축과 평행한 공극자속에 의해 발생한다. 본 논문에서 다루고자하는 AFPM 전동기는 3상 전기자 권선이 된 고정자를 가운데 놓고 양쪽으로는 영구자석이 부착된 회전자 배치하게 되는 형태이다.

그림 1은 AFPM 전동기의 구조와 prototype 전동기를 나타내었으며, 그림 2는 Stator 권선의 배열과 PM rotor의 위치를 보여준다.

AFPM 전동기의 특성은 일반적인 브러시리스 전동기의 특성과 다르지 않다. 특성방정식은 Coreless 전동기에 대하여 계산할 수 있는데 코일의 배열방향인 θ 와 자

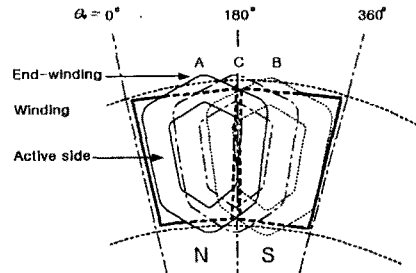


그림 2. Stator 권선의 배열과 PM rotor의 위치

속방향인 z축에서의 크기를 h_0, h_z 라고 한다. 턴수가 N개이고 코일이 실질적으로 힘을 받는 부분(active side)을 r이라 하면, 고정자의 외경(r_{max})과 내경(r_{min})의 차를 말한다. 자속 밀도의 크기가 일정하다고 가정하고 코일이 받는 힘, F_c 는 식(1)로 나타낼 수 있다.

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

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

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

도체와 전코일에 대한 토크는 식(3, 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)에서부터 도체 단면의 유기기전력식도 나타낼

수 있는데 식 (5)와 같다.

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

v 는 자장속에서의 도체의 상대 속도를 나타낸다.

식 (5)로부터 도체와 코일의 유기기전력을 식 (6, 7)로 나타낼 수 있다.

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

$$E_{coil} = I \sum_{k=1}^{N_k} B_{zk}(\theta, z, r) r dr \quad (7)$$

ω_r 은 도체의 각속도를 나타낸다.

2.2 유한요소법을 이용한 자속분포

자속 분포에 대한 시뮬레이션을 Infolytica사의 MagNet 프로그램을 이용하였다. 이 전동기의 자로는 모든 경로에서 균일하게 형성이 되므로 부분적인 자료만을 해석함으로써 자기회로의 특성을 파악할 수 있다. 이 시뮬레이션 결과로 공극에서 도체와 쇠교하지 못하고 인접한 영구자석 사이에서 생성되는 누설 자속과 회전자 disc 간의 누설이 있음을 알 수 있다. 그림 3은 AFPM 전동기의 FEM을 이용한 자속 분포를 나타낸다.

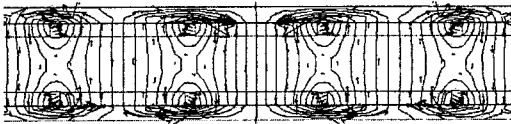


그림 3. FEM을 이용한 자속 분포

2.3 자속위치검출을 위한 센서

AFPM 전동기의 자속위치검출을 위한 센서의 선정 및 취부 위치를 결정하기에 앞서 시뮬레이션 결과에 따라 Prototype을 제작하였으며 사양은 표 1과 같다.

BLDC 전동기의 구동을 위한 Driver는 Six-Step 방식과 PWM 방식으로 실험을 하였으며 전동기의 제어에 우수한 PWM Driver를 선정하였다. 그림 4은 Six-Step, PWM Driver를 사용시 상전압과 선간전압을 보여준다.

표 1. Prototype AFPM 전동기의 사양

상 수	3
극 수	14
코일 도체의 직경	0.8 mm
	0.5mm(보조권선)
상당 코일 수	14 EA
코일 당 턴 수	22 turn
	보조권선 12 turn
한상의 인덕턴스	0.1 mH
한상의 저항	0.38 Ω
회전자 외경 (R_o)	154 mm
회전자 내경 (R_i)	88 mm
고정자의 두께	9 mm
회전자 철심의 두께	5 mm
전체 축방향 길이	27 mm

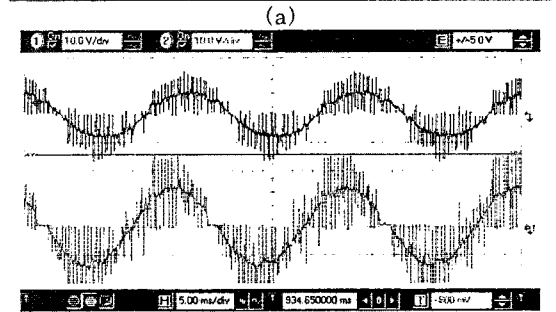
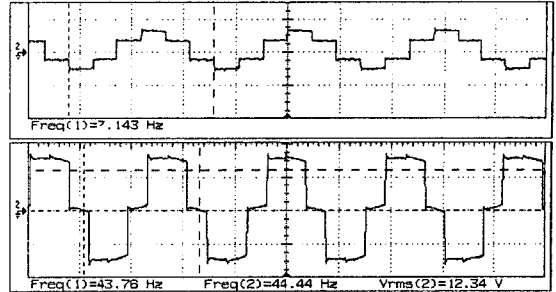


그림 4. (a) Six-step Drive, (b) PWM Driver 사용시 상전압, 선간전압

아울러 본 논문에서 다루는 자속위치검출을 위한 센서는 일본 Asahi KASEI 회사의 홀센서 HW-105A 모델을 적용하였다. 센서의 사양은 표 2와 같다. 센서의 취부 위치는 각 상당 4군데를 선정하였으며 센서의 부착 위치에 있어 그림 2의 전기각 0° 를 기준으로 하여 $\alpha = 0^\circ, 30^\circ, 60^\circ, 90^\circ$ 에 취부하고 그 상세도는 그림 5와 같다.

표 2. 적용 Hall sensor 사양

Model	HW-105A	Asahi KASEI.co
Output Hall Voltage, V_H	122~274 mV	Const. Voltage Drive B=50mT
Offset Voltage, V_{os}	-12 ~ +12 mV	B= 0mT
Input Resistance, R_{in}	250 ~ 450 Ω	
Output Resistance, R_{out}	250 ~ 450 Ω	
Operating Temp Range, T_{op}	-40 ~ +110 $^\circ\text{C}$	

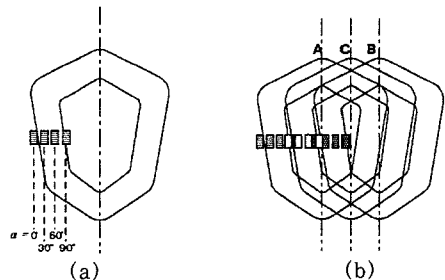


그림 5. 홀센서 취부 위치, (a) 한상, (b) 3상

자속의 위치검출 위치에 따른 홀전압과 유기기전력의 발생 위치에 대한 검증 실험은 그림 6의 홀전압과 유기기전력 파형에서 확인할 수 있다.

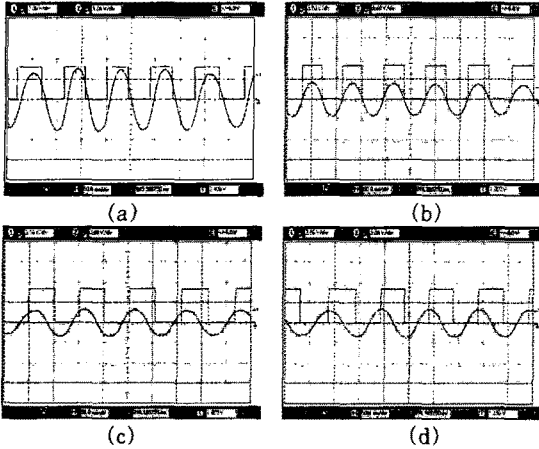


그림 6. 홀전압과 유기기전력, (a) $\alpha=0^\circ$, (b) $\alpha=30^\circ$, (c) $\alpha=60^\circ$, (d) $\alpha=90^\circ$

2.4 실험 및 결과

전동기에 전원은 자속위치 검출을 위한 홀센서의 신호에 따라 인가하는데 이때 입력전압과 전류, 위상각(ψ)이 전동기의 제어시 속도, 토크 특성 및 효율에 큰 영향을 미친다. 전압과 전류 위상차 $\angle 0^\circ$ 일 때 양호한 전류와 고효율을 얻을 수 있어 가장 이상적이다. 이를 알아보기 위한 무부하와 부하실험을 하였다. [3]

그림 7은 α 각에 따른 무부하시 속도 대 상전류의 특성을 보여준다. 스위칭 타이밍의 조건에 따라 30° 인 경우 속도특성이 양호한 반면 $\alpha=0^\circ$ 와 90° 인 경우 같은 속도대에서 전류의 크기가 8~9배 증가하였으며 효율이 저하되었고 속도의 안정도가 떨어지며 소음과 진동이 증가하였다. 또한 $\alpha=0^\circ$ 와 60° 에서 특정 속도 영역에서는 전류가 감소되는 구간이 있는데 이는 역기전력의 증가와 부하시 전기자 반작용으로 인한 전류의 shift가 일어나서 자속 검출 위치의 각도가 위상차를 감소시키는 방향으로 일어나기 때문이다.

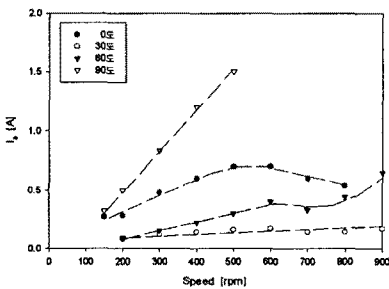


그림 7. 센서별 무부하시 속도 대 상전류

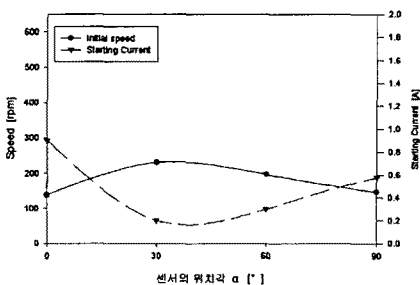


그림 8. 센서별 초기속도 및 기동전류

그림 8에서는 무부하시 초기속도 및 기동전류 특성을 α 각에 따라 나타낸다. 실험에서 $\alpha=0^\circ$ 일 때 초기속도 및 기동전류는 130rpm에 0.9 A였고, $\alpha=30^\circ$ 에서는 230rpm에 0.2 A였다. 이것은 0° 일 때 전류가 높은 반면 속도 범위가 넓고, 30° 일 때는 낮은 기동전류에 0° 보다는 속도 조정 범위가 좁음을 알 수 있다.

그림 9는 정격속도 400rpm에서 α 각에 따른 역기전력(상)과 전류파형(하)이다. $\alpha=0^\circ$ 일 때 $\psi=-59.4^\circ$, $\alpha=60^\circ$ 일 때 $\psi=54^\circ$, $\alpha=90^\circ$ 일 때 $\psi=90^\circ$ 임을 알 수 있다. $\alpha=30^\circ$ 인 경우 전압과 전류의 위상이 거의 일치하며 전류의 파형도 다른 경우와 비교해 볼 때 양호하므로 이 운전점이 최적임을 알 수 있다. 종합적으로 볼 때 이 전동기인 경우 최적의 운전점은 α 각이 전기각 30° 이다.

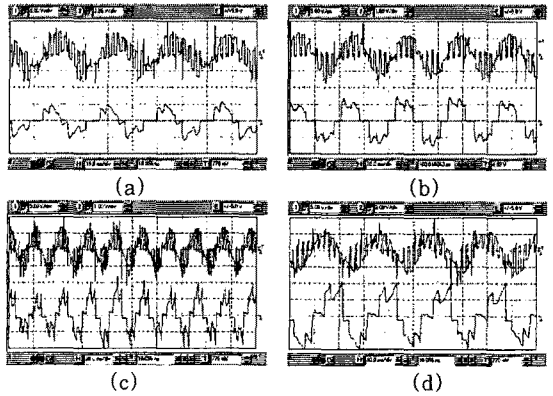


그림 9. 400rpm일 때 역기전력과 전류파형, (a) $\alpha=0^\circ$, (b) $\alpha=30^\circ$, (c) $\alpha=60^\circ$, (d) $\alpha=90^\circ$

3. 결 론

AFPM 전동기의 자속 검출위치에 따른 특성을 살펴 보았다. 무부하 및 부하 실험한 결과 30° 에서 45° 범위에서 전류 및 효율에 있어 우수한 특성을 보였다. 이는 자속의 위치에 맞추어 스위칭 타이밍이 적절함을 알 수 있었다. 하지만 이외의 영역에서는 전류의 증가와 속도의 불안정, 소음과 진동이 심하였다. 결과적으로 부하 실험시 역기전력과 전기자 반작용의 영향을 크게 받아 효율이 저하되는 결과를 알 수 있었다.

이 실험결과를 토대로 자속 검출을 위한 센서의 위치의 중요성을 알게 되었으며, 제어시 보상방법에 대한 연구가 요구된다.

[참 고 문 헌]

- [1] 공정식, "AFPM 전동기의 설계와 특성해석", pp. 1-6, 96-120, 2000
- [2] Kartik Sitapati and R. Kishnan, "Performance Comparisons of Radial and Axial Field, Permanent-Magnet, Brushless Machines", IEEE Trans. Ind. Applicat., Vol. 37, No. 5, pp1219-1226, 2001
- [3] Peter Vas, "Sensorless vector and direct torque control", Oxford science publications, pp. 11-15, 1998
- [4] S.K. Safi, P.P Acarnley and A.G. Jack, "Analysis and simulation of the high-speed torque performance of brushless DC motor drivers", IEE Proc.-Electr. Power Appl. Vol. 142, No. 3, pp 191-200, 1995
- [5] Mulukutla S. Sarma, "Electric Machines", PWS Publishing company, pp.353-357