

## Double-layer AFPM 전동기의 특성해석

공정식\*, 유현오\*\*, 오철수\*\*  
 서라벌대학\*, 경북대학교\*\*

## Characteristics Analysis of Double-layer AFPM Motor

Jeong-Sik Kong\*, Hyune-O Yoo\*\*, Chul-Soo Oh\*\*  
 Sorabol college\*, Kyungpook Nat. Uni.\*\*

**Abstract** - This paper proposed a method to reduce torque ripple of double-layer axial flux permanent magnet motor. Torque is generated by interacting between current of stator winding and airgap flux.

In the case of slotless axial flux permanent magnet motor, only commutation torque component is significant. Hence, cogging and reluctance torque will not be considered.

For this propose, we were supplied differential phase current in each winding and shifted rotor magnet. According to shifted rotor magnet and flux and phase of current were shifted, phase of developed torque in each side is difference.

As a result, we could reduce the total torque ripple in motor and obtain minimum torque ripple in the case of 7.5 degree shifting angle between two rotors.

### 1. 서 론

Brushless 직류전동기는 전력용 반도체 소자의 스위칭에 의해 고정자 권선에 전류가 공급되고, 고정자 권선에 흐르는 전류와 영구자석에 의한 공극 자계의 상호관계에 의하여 토크가 발생한다. 이때 권선에 흐르는 구형파 또는 정현파의 전류와 불균일한 공극자속 등에 의하여 전동기에 토크 맥동이 발생하게 된다. 이러한 토크 맥동은 진동, 노이즈 등의 원인이 되어 전동기의 제어에 부정확성의 문제를 발생시키며 [3], 일반적으로 영구자석 전동기의 경우 다음의 세가지 요인에 의하여 토크 맥동이 발생하게 된다[1][2][3][4].

- 1) 회전자 자석과 고정자 철심에 의한 코깅토크
- 2) 고정자 권선의 자기인덕턴스의 변화에 의한 릴럭턴스 토크
- 3) 고정자 권선의 전류와 공극자속의 상호작용에 의한 토크

슬롯리스형의 AFPM 전동기의 경우 1) 에 의한 코깅토크 및 2) 에 의한 릴럭턴스 토크는 발생하지 않으며, 주로 3) 의 작용에 의해 토크가 발생하게 된다.

현재 이러한 토크 맥동을 줄이기 위해 자극의 구조 및 형상 설계 및 고정자 권선의 전류설계 등에 이르기까지 많은 연구가 진행되고 있다[2][5][6].

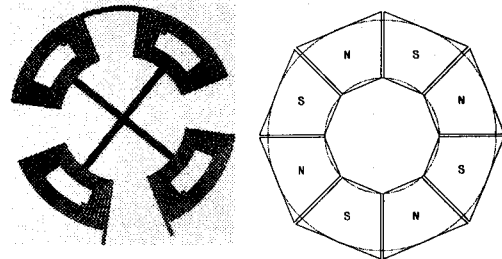
본 논문에서는 불균일한 자계에 의해 발생하는 토크 맥동을 줄이기 위하여 전동기를 다층 구조로 만들고 각 층에서 발생하는 토크의 위상을 변화시켜 맥동토크의 발생을 줄이고자 한다. 이를 위하여 두 회전자 영구자석의 위치를 상대적으로 이동시키고 권선에 흐르는 전류의 위상에 차이를 발생시켜 각 회전자에 발생하는 토크에 위상차가 생기도록 한다. 따라서 전동기의 전체토크는 두 회전자가 발생하는 토크의 합으로 나타나므로 전동기의 맥동토크를 감소시킬 수 있을 것이다.

### 2. 본 론

#### 2.1 AFPM 전동기의 구조

AFPM 전동기의 고정자 및 회전자 형상이 그림 1.(a) 및 (b) 에 나타나 있다. 본 실험에 사용된 AFPM 전동기의 고정자 권선의 구조는 그림 1.(a)와 같이 오렌지형으로 되어 있으며, 이 권선을 각각 120°씩 이동시켜 3상 권선이 구성된다.

또한 회전자의 형태는 그림 1.(b)와 같이 디스크 형태의 원판에 영구자석이 부착된 형태이며, 양쪽 코일과의 쇠교자속을 만들기 위하여 코일의 양면에 두 개의 회전자 디스크를 가진다. 따라서 고정자 양쪽의 두 개의 영구자석 회전자에서 토크를 발생하게 된다.



(a) 상당 고정자 권선 (b) 회전자 자석  
 (a) winding of 1 phaser (b) rotor magnet

그림 1. 고정자 및 회전자 형상  
 Fig.1 Figure of stator and rotor

고정자 철심은 테이프형 귀소강판을 감아 토러스형으로 만들어 사용하였다. 이렇게 함으로써 Axial 방향 자속의 흐름을 용이하게 하고 또한 원주 방향으로 자속의 폐환경로를 만들 수 있게 되어 전 자로를 통한 누설자속을 감소시킬 수 있는 장점을 가지게 된다.

#### 2.2 토크 및 유기기전력

일반적으로 전동기의 토크는 식 (1) 과 같이 나타나며, 식 (1) 에서 전동기의 속도가 일정하다고 가정하면 토크는 권선의 유기기전력과 권선의 전류값에 의해 결정된다.

$$\omega T = E \times I \quad (1)$$

또한 n 상 brushless 전동기라면 전체 발생 토크는 식 (2) 와 같이 나타낼 수 있다.

$$T_{total} = \sum_{i=1}^n \frac{E_i \times I_i}{\omega} \quad (2)$$

여기서  $E_i$  및  $I_i$  는 한상의 유기기전력 및 권선전류를 나타내는데, 일반적으로 정현파가 아닌 경우 푸리에 급수를 사용하여 1상의 유기기전력 및 전류의 식은 각각 식 (3), (4) 와 같이 나타낼 수 있게 된다.

$$E_i(\theta) = \sum_{k=-\infty}^{\infty} e_{1,k} \exp(jk\theta) \quad (3)$$

$$I_i(\theta) = \sum_{k=-\infty}^{\infty} I_{1,k} \exp(jk\theta) \quad (4)$$

또한 AFPM 전동기의 유기기전력은 공극자속밀도 및 회전자 속도 그리고 기계적 상수에 의하여 구해지며, 이와 같은 관계를 고려하여 유기기전력은 식 (5) 와 같이 속도와 공극의 자속밀도 값으로 표현할 수 있다.

$$E_i(\theta) = K_p N_{sp} P (R_o^2 - R_i^2) B(\theta) \omega_m \quad (5)$$

또한 AFPM 전동기의 토크는 유기기전력 및 전동기 권선에 흐르는 전류의 상호작용에 의하여 발생하고 유기기전력은 자속밀도의 함수이므로 발생토크는 식 (6) 과 같이 나타낼 수 있다.

$$T(\theta) = K_p P m N_p (R_o^2 - R_i^2) B(\theta) I(\theta) \quad (6)$$

$R_o, R_i$  : 전동기의 외경 및 내경,  $m$  : 상수  
 $N_{sp}$  : 상당 극당 권선수,  $K_p$  : 극피치에 대한 고정자 도체가 자속과 교차하는 면적의 비로 즉, AFPM 전동기에서 토크는  $B(\theta), I(\theta)$  에 의해 발생한다는 것을 알 수 있다.

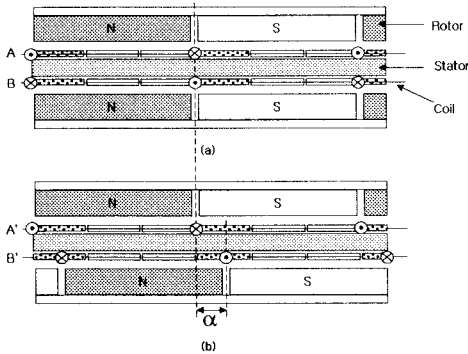


그림 2. 영구자석회전자 및 고정자권선의 배치  
**Fig. 2** Displacement of magnet rotor and stator winding

2층구조 AFPM 전동기의 단면의 형상을 그림 2.에 나타내었다. 고정자 권선을 중심으로 양쪽에 영구자석이 배치되어 있는 구조이므로 영구자석 회전자 위치에 따라 각면의 공극 자속분포도 달라지게 된다.

그림 2.에서 (a) 와 같이 회전자 영구자석이 마주보고 있는 구조에서는 각 면의 공극의 자속밀도는 (7) 및 (8) 과 같다.

$$B_A(\theta) = \sum_{k=-\infty}^{\infty} B_k \exp(jk\theta) \quad (7)$$

$$B_B(\theta) = \sum_{k=-\infty}^{\infty} B_k \exp(jk\theta) \quad (8)$$

그러나 (b) 의 경우와 같이 한쪽의 회전자 영구자석이  $\alpha$  만큼 이동되어 있다면 A' 면 및 B' 면에 발생하는 공극 자속 분포는 그림 3과 같이 되어 A' 면에 생기는 공극의 자속밀도는 식 (9) 와 동일하게 식 (10) 으로 나타낼 수 있지만 B' 면의 공극자속밀도는 식 (10)와 같이 달라지게 된다.

$$B_{A'}(\theta) = \sum_{k=-\infty}^{\infty} B_k \exp(jk\theta) \quad (9)$$

$$B_{B'}(\theta) = \sum_{k=-\infty}^{\infty} B_k \exp(jk\theta + \alpha) \quad (10)$$

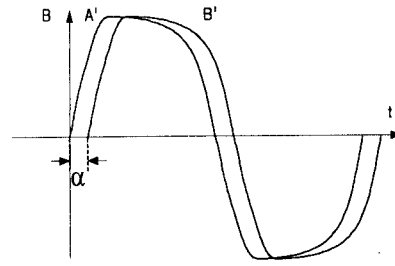


그림 3. 공극의 자속분포

**Fig. 3** Flux distribution of airgap  
 이와 같이 회전자 자속 분포가  $\alpha$  각 만큼 이동되므로 양측면의 권선의 전류를 식 (11) 및 (12) 와 같이 서로  $\alpha$  만큼 위상차를 주어 인가하면 전동기에 발생하는 토크의 위상도 따라서 달라지게 된다.

$$I_{A'}(\theta) = \sum_{k=-\infty}^{\infty} I_{1,k} \exp(jk\theta) \quad (11)$$

$$I_{B'}(\theta) = \sum_{k=-\infty}^{\infty} I_{1,k} \exp(jk\theta + \alpha) \quad (12)$$

즉, 전동기의 토크는 식 (6) 과 같이 각 면에서의 자속 분포 와 전류의 상호작용에 의해 발생하므로, 양측의 회전자에서 각각 발생하는 토크의 위상이  $\alpha$  만큼 차이가 생기고, 따라서 전체 토크는 두 회전자에서 발생하는 토크의 합이므로 전체 발생토크도 달라지게 된다. 다시말하면, 회전자 A' 의 발생토크와 회전자 B' 의 발생토크의 위상이 다르게 되어 전동기 전체에서 발생하는 토크의 맥동은 줄어들 것으로 생각된다.

각 면의 토크는 식 (13) 및 (14) 와 같이 나타난다.

$$T_{A'}(\theta) = K B_{A'}(\theta) I_{A'}(\theta) \quad (13)$$

$$T_{B'}(\theta) = K B_{B'}(\theta) I_{B'}(\theta) \quad (14)$$

전체토크는 식 (15) 와 같이 되어

$$T_{total} = T_{A'} + T_{B'} \quad (15)$$

각각의 토크를 합한 전체토크는 그림 2.(a)의 경우에 대하여 전체 토크는 식 (16) 과 같이 나타나며, (b) 의 경우에는 식 (17) 과 같이 나타나 토크가 달라지게 된다.

$$T_{total} = 2 \sum_{k=-\infty}^{\infty} B_k \exp(jk\theta) \sum_{k=-\infty}^{\infty} I_{1,k} \exp(jk\theta) \quad (16)$$

$$T_{total}' = \sum_{k=-\infty}^{\infty} B_k \exp(jk\theta) \sum_{k=-\infty}^{\infty} I_{1,k} \exp(jk\theta) + \sum_{k=-\infty}^{\infty} B_k \exp(jk\theta + \alpha) \sum_{k=-\infty}^{\infty} I_{1,k} \exp(jk\theta + \alpha) \quad (17)$$

### 2.3 구동회로시스템

AFPM 전동기 토크특성실험을 위하여 전압형 3상 인버터 구동시스템을 구성하였다. 구성된 구동시스템의 블록다이어그램은 그림 4.에 나타나 있다.

본 실험에서는 고정자의 양쪽 코일에 서로 다른 위상의 전류를 공급해야 하기 때문에 두 개의 위치검출 센서가 필요하고 따라서 구동 인버터 시스템도 두 개가 필요하다.

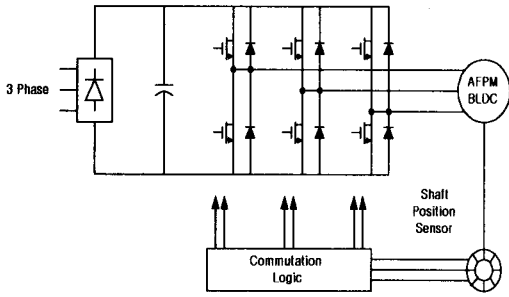


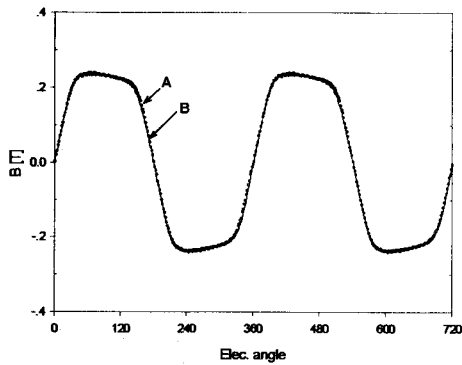
그림 4. AFPM 전동기 구동을 위한 인버터시스템  
Fig. 4 Inverter for driving AFPM motor

#### 2.4 실험결과 고찰

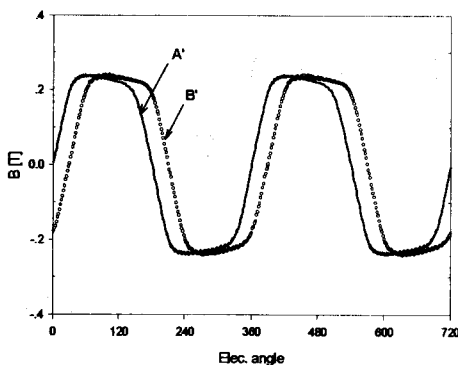
Prototype AFPM 전동기에 대하여 회전자 영구자석의 위치를 이동시키고 각면의 권선에 회전자 영구자석의 이동각에 해당하는 만큼 전압의 파형이 이동시켜 인가하고 전동기의 발생토크를 측정하였다.

그림 5.는 측정한 각 면의 공극자속 분포를 보여준다. 그림 5.(a)는 회전자 자석을 이동시키지 않고 마주보는 위치에 있을 때 각 면 A 및 B의 공극자속 분포를 나타내고 있다.

두 회전자가 마주보는 위치에서 각 공극면의 자속분포는 일치하는 것을 볼 수 있다.



(a)  $\alpha = 0$



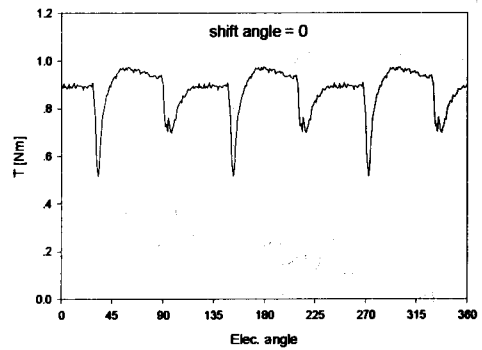
(b)  $\alpha = 30$

그림 5. 공극면에서의 자속분포  
Fig. 5 Flux distribution of each arigap

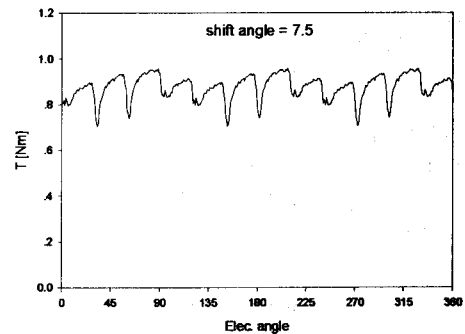
또한 그림 5(b)는 두 회전자 자석 및 권선의 위치를 기계각으로  $7.5[^\circ]$  이동시켰을 때 측정된 각 공극의 자속 분포를 보여준다. 그림 5.에서 알 수 있는 바와 같이 자극을 이동시키고 스위칭 전류를 위상차를 두어 흘렸음에도 공극의 자속 분포의 형태는 차이가 없었으며, 단지 위상만 이동하는 것을 알 수 있다.

또한 본 논문에서는 전동기의 토크 발생 특성을 확인하기 위하여 회전자 영구자석의 위치를 이동시켜가면서 각 경우의 토크 특성을 측정하였다.

그림 6.은 각 회전자 각 위치에서의 토크를 나타내고 있다. (a)는 영구자석 회전자의 위치가 일치하고 있을 때의 ( $\alpha = 0$ ) 토크 곡선이며, 전기각 60도의 주기로 맥동 토크가 발생함을 알 수 있었으며, 이것은 고정자 권선이 3상으로 구성되어짐으로 인하여 발생한다. 그림(b)는  $7.5[^\circ]$  이동되었을 때의 토크 맥동 형상을 나타내며, 가장 적은 맥동토크를 발생함을 측정할 수 있었다. 또한 각 경우의 전동기의 평균 발생토크는 차이가 나지 않음을 알 수 있었다.



(a)



(b)

그림 6. 전동기의 토크발생 파형  
Fig. 6 Torque waveform of motor

그림 7.은 두 회전자 자석을 이동시키고 전류에 위상차를 둔 경우 이동각에 따른 % 맥동 토크를 나타내고 있으며, 맥동토크는 전기각 0 도에서 가장 크게 나타나고, 회전자 영구자석 및 고정자 권선의 이동에 따라 급격히 감소하다가 약 8 도에 이르러서는 맥동토크의 변화가 미미하게 나타나는 것을 알 수 있다.

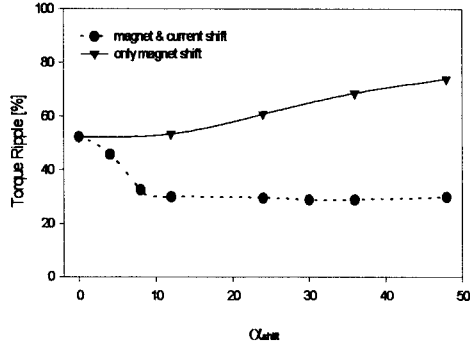


그림 7. 이동각에 따른 토크 맥동률  
Fig. 7 Torque ripple for shift angle

토크의 맥동은 30도의 이동각에서 최소값을 나타내었으며, 0도 때의 토크 맥동에 비하여 25% 정도 감소함을 알 수 있었다. 그림 7.에서 실선그래프는 고정자 권선에 동상의 전류를 인가하였을 때의 토크 특성을 보여준다. 회전자 영구자석만을 이동하였을 경우 이동각에 따라 오히려 맥동토크가 증가하는 것을 보여주고 있다. 이것은 각 회전자에 발생하는 전동기의 토크가 동위상으로 발생하기 때문이다.

### 3. 결 론

양축식 AFPM 전동기에 대하여 회전자 영구자석 및 고정자 권선의 위치를 이동시킨 결과 다음과 같은 결과를 얻을 수 있었다.

- 1) 두 회전자 영구자석 이동시키고 고정자 권선전류의 위상을 같이 이동시키에 따라 맥동토크를 감소시킬 수 있었다.
- 2) 맥동 토크를 최소로 하는 회전자 이동각은 30(°)로 나타났다.
- 3) 8(°)이동시까지 맥동토크는 급격히 감소하였으며, 그 이상의 이동각에 대하여는 변화가 미미하였다.
- 4) 위치각 이동에 따른 평균 토크의 변화는 없었다.

2층 구조의 AFPM 전동기 토크 맥동실험을 통하여 위와 같은 결과를 얻었으며, 이러한 결론은 다층 구조전동기에 적용할 경우 효율적인 맥동토크 감소법이 될 것으로 생각된다.

### 참 고 문 헌

- [1] Takeo Ishikawa, Gordon R. Slemon, " A Method of Reducing Ripple Torque in Permanent Magnet Motors without Skewing", IEEE Transactions on Magnetics, Vol. 29, No. 2, 1993, pp. 2028 -2030
- [2] Tomy Sebastian, Vineeta Gangla, " Analysis of Induced EMF Waveforms and Torque Ripple in Brushless Permanent Magnet Machine " IEEE Transactions on Industry Applications. Vol. 32, No. 1, 1996, pp. 195-200
- [3] Jaime de la Ree, Nady Boules, " Torque Production in Permanent-magnet Synchronous Motors", IEEE Transactions on Industry Applications, Vol. 25 No. 1, 1989, pp. 107-112
- [4] Rajesh P. Deodhar, David A. Staton, Timothy j. E. Miller, " Modeling of Skew Using the Flux-MMF Diagram", IEEE Transactions on Industry

- Applications. Vol. 32 No. 6, 1996, pp. 1339-1347
- [5] Thomas M. Jahns, "Torque Production in Permanent-Magnet Synchronous Motor Drives with Rectangular Current Excitation", IEEE. Transactions on Industry applications. Vol IA-20, NO 4, 1984.
- [6] Yoshihiro Murai, et al. " Torque Ripple Improvement for Brushless DC Miniature Motors ", IEEE. Transactions on Industry applications. Vol 25, NO 3, 1989. pp. 441-450