

## 자극센서 없는 영구자석 동기전동기의 초기 자극위치 추정

이진우

두원공과대학 자동화시스템과, jinwoo@doowon.ac.kr

### Initial Pole Position Estimation of a Magnetic Pole Sensorless Permanent Magnet Synchronous Motor

Jin-Woo Lee

Dept. of Automation Systems, Doowon Technical College, jinwoo@doowon.ac.kr

#### ABSTRACT

This paper describes an initial pole position estimation method of a magnetic pole sensorless permanent magnet synchronous motor(PMSM) with an incremental encoder. The accurate initial pole position is estimated by using an efficient numerical method of Secant Method, which finds either of two zero torque/force positions and then the correct d-axis. It can be simply applicable to both rotary and linear PMSM because it only requires the tuned current controller and the relative position information. The experimental results show the validity of the proposed method with respect to highly accurate pole position estimation under the moderate moving distance and convergence time.

#### 1. 서 론

영구자석 동기전동기의 고정도 제어를 위해서는 회전자 자극위치에 대한 정확한 정보가 반드시 필요하다. 대부분의 상용 회전형 또는 선형 서보 모터는 이를 위하여 증분형 엔코더와 회전자 자극위치 센서인 홀센서(Hall Sensor)를 사용한다. 홀센서의 U,V,W 3상 출력을 이용하면 초기 자극위치를 전기각으로  $\pm 30^\circ$  오차범위 내로 추정 가능하며, 이 추정각도를 이용하여 제어를 시작한 후에 홀센서 신호가 입력되면 정확한 자극위치를 이용하여 제어한다.<sup>[1]</sup> 그러나, 자극위치 센서를 사용하지 않는 것이 가격, 부피 등의 면에서 경제적으로 유리하므로 적절한 방법으로 자극위치 정보를 얻기 위한 연구가 진행되고 있다.<sup>[1]-[3]</sup> 기존의 자극위치를 찾는 방법으로 일정 직류전류를 인가하는 방법이 있으며, 이 방법은 구현이 간단한 장점이 있으나 전동기의

이동거리가 최대 전기각  $\pm 180^\circ$ 로 큰 것과 소음이 크다는 단점이 있다.<sup>[1]</sup> 한편 전기각  $90^\circ$ 의 위상차를 가진 2개의 전류 값을 이용하는 방법은 동일 속도에서 추력이 같다는 개념을 이용하므로 속도제어가 필요하다.<sup>[2]</sup> 작은 정현파 위치지령을 인가한 상태에서 정상상태 응답을 이용하여 초기 자극위치를 추정하는 방법은 위치제어가 필요하다.<sup>[3]</sup> 그리고, Dither Commutation Initialization 방법은 시험전류를 인가하여 초기에  $180^\circ$  범위 내에서 자극위치를 판별하고, 다음에는  $90^\circ$ , 다음에는  $45^\circ$ 와 같이 순차적으로 자극위치를 찾아가는 것으로 전동기가 움직이지 않는 것을 수렴조건으로 이용한다. 시험 전류의 크기는 진동과 수렴 정밀도를 고려하여 설정한다.<sup>[1]</sup>

실용적인 초기 자극위치 추정방법은 높은 자극위치 추정 정도, 짧은 이동거리, 빠른 추정시간, 외란에 대한 강인성, 저소음, 적용 용이성 등의 조건을 충족하는 것이 필요하다.

본 논문에서는 이러한 요구조건을 고려한 초기자극위치 추정 방법으로서 Secant Method를 적용하여 전동기의 토크 또는 추력이 영이 되는 위치를 추정하는 방법을 제시하고, 추정 정밀도를 높이기 위하여 시험전류 크기를 증가하는 방법을 제안하며, 이동거리 최소화 및 소음감소 방법을 제안한다. 회전형 및 선형 동기전동기에 대한 실험을 통하여 제안한 방법의 타당성과 유용성을 보이고자 한다.

#### 2. PMSM의 자극위치 추정

PMSM의 초기 자극위치 추정과 관련하여 먼저 전동기의 자극위치에 대한 토크/추력 특성을 분석하고, 이를 바탕으로 추정 요구조건을 만족하는 추정방법을 제안하고자 한다.

##### 2.1 PMSM의 자극위치에 토크/추력 특성

회전형 및 선형 PMSM의 토크(T) 및 추력(F)은 식 (1) 및 식 (2)와 같다.<sup>[4]</sup>

$$T = \frac{3}{2} \frac{P}{2} \lambda_f I_{qse} \text{ [N} \cdot \text{m]} \quad (1)$$

$$F = \frac{3}{2} \frac{\pi}{\tau} \lambda_f I_{qse} \text{ [N]} \quad (2)$$

여기서,  $P$ : 회전형 전동기의 극수,  $\tau$ : 선형 전동기의 극간격,  $\lambda_f$ : 영구자석에 의한 자속,  $I_{qse}$ : 동기좌표계 q축 전류이다.

회전형과 선형 동기전동기의 토크와 추력은 각각 식 (1) 및 식 (2)와 같이 전동기의 동기좌표계 q축 전류에 비례한다. 그림 1은 실제 전동기의 동기좌표계( $dq_{real}$ )에 대한 추정 동기좌표계( $dq_{est}$ )의 관계를 나타낸 것이며, 각도  $\phi_i$ 는 초기 회전자 자극위치에 따라 정해지는 초기 각이다. PMSM의 정밀한 q축 전류제어를 위해서는 초기 각에 대한 정확한 정보가 반드시 필요하다.

그림 1과 같이 추정 d축에 전류( $I$ )를 인가하면 전동기의 q축 전류는 식 (3)과 같이 초기각의 정현파 함수가 되며, 토크 및 추력도 초기각의 정현파 함수가 된다. 여기서 토크 및 추력은 초기각에 대하여 같은 특성을 가지므로 추후에는 선형 전동기 관점에서 살펴보기로 한다.

$$I_{qse} = I \cdot \sin \phi_i \quad (3)$$

식 (3)을 식 (2)에 대입하여 추력을 구하면 식 (4)와 같으며, 그림 2는 식 (4)의 추력을 나타낸 것이다.

$$F = \frac{3}{2} \frac{\pi}{\tau} \lambda_f I \cdot \sin \phi_i \quad (4)$$

그림 2에서 추정 d축 전류에 대하여 추력은 초기 오차 각  $\pm 90^\circ$ 에서 크기가 최대이고,  $0^\circ$ 와  $\pm 180^\circ$ 에서 영의 값을 가진다. 따라서 추력이 영이거나 최대 크기인 상태를 찾으면 초기각에 대한 값을 추정할 수 있다.

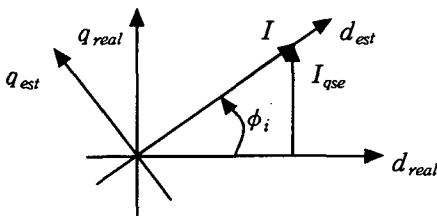


그림 1 동기좌표계상의 초기 자극위치  
Fig. 1 Initial pole position in the synchronous reference frame

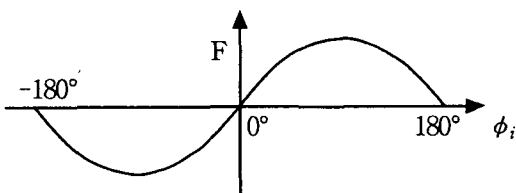


그림 2 초기 자극위치 각도에 대한 추력  
Fig. 2 Thrust force with respect to the angle of initial pole position

## 2.2 Secant Method에 의한 자극위치 추정

PMSM의 초기 자극위치 추정 요구조건을 고려한 본 논문의 추정방법은 다음과 같다.

먼저, 식 (4)의 추력에 대하여  $\phi_i$ 에 대한 미분을 취하면 식 (5)와 같다.

$$\frac{dF}{d\phi_i} = \frac{3}{2} \frac{\pi}{\tau} \lambda_f I \cdot \cos \phi_i \quad (5)$$

식 (5)는  $\phi_i$ 에 대한 추력 민감도로서 추력이 영인  $\phi_i = 0^\circ, \pm 180^\circ$ 에서 민감도 크기가 최대이고, 추력의 크기가 최대인  $\phi_i = \pm 90^\circ$ 에서의 민감도는 영이다. 따라서 추력의 크기가 최대인  $\phi_i = \pm 90^\circ$ 를 추정하는 경우에 이 부근에서 민감도가 작아 높은 추정 정도를 얻는 것이 곤란하다. 반면에 추력이 영인  $\phi_i = 0^\circ, \pm 180^\circ$ 를 추정하는 경우에는 이 부근에서 민감도가 크기 때문에 높은 추정 정도를 얻는 것이 가능하므로 본 논문에서는 추력이 영인 상태를 추정하도록 한다.

한편, 식 (5)에서 민감도는 추정 d축 시험전류( $I$ )의 크기에 비례하므로 민감도를 증가시키기 위해서는 큰 전류를 인가하는 것이 필요하다. 그러나, 초기에  $\phi_i$ 의 값을 모르는 상태에서 큰 전류를 인가하면 식 (4)에 의한 큰 추력이 발생할 수 있다. 따라서 이를 피하기 위해 본 논문에서는 작은 전류를 인가하여 추정을 시작하고, 초기 자극위치에 대한 추정값이 일정 범위 내로 수렴하면 시험전류를 증가하여 추정을 계속하고, 다시 일정 범위 내로 수렴하면 시험전류를 증가하는 방법으로 최대 시험전류까지 전류를 증가하여 초기각 추정 정도를 높이도록 한다.

시험전류를 인가하여 단순한 반복적인 방법으로도 초기 자극위치를 추정할 수 있으나, 본 논문에서는 수치해석법 중에서 수렴성이 우수하고 함수값이 영인 상태를 추정하는 Secant method<sup>[5]</sup>를 적용하여 그림 2에서 추력이 영인 상태를 추정하도록 한다.

주어진 임의의 초기각  $\phi_{i1}, \phi_{i2}$ 에 대하여 식 (4)에 의한 추력이  $F_1, F_2$ 일 때 Secant method에 의한 추정 초기각  $\phi_{i3}$ 은 식 (6)과 같다.

$$\phi_{i3} = \phi_{i2} - F_2 \cdot \frac{\phi_{i2} - \phi_{i1}}{F_2 - F_1} \quad (6)$$

한편, 다음 스텝에서의 추정을 위한 초기각은 식 (7)과 같이 수정된 초기각을 사용한다.

$$\phi_{i1} = \phi_{i2}, \quad \phi_{i2} = \phi_{i3} \quad (7)$$

한편, Secant method를 적용하기 위해서는 식 (6)을 계산하기 위한 추력 값이 필요하다. 그러나 추력은 식 (4)에서 전동기 상수와 회전자 자극 위치를 알아야 하기 때문에 자극위치를 모르는 상태

에서는 필요한 추력 값을 얻을 수 없으므로 다른 방법이 요구된다.

선형 전동기의 기계적인 동적 방정식은 일반적으로 식 (8)과 같이 나타낼 수 있다.

$$F = m \frac{dv}{dt} + B \cdot v + F_d \quad (8)$$

여기서,  $m$ : 가동자의 질량,  $v$ : 가동자의 속도,  $B$ : 마찰계수,  $F_d$ : 부하 추력을 포함하는 외란에 해당하는 추력이다.

식 (8)에서 속도는 전동기의 다른 값이 모두 같을 때 인가한 추력에 비례하며, 속도를 적분한 이동거리 역시 추력에 비례함을 알 수 있다. 따라서, 추력 값에 비례하는 가동자의 속도 또는 이동거리를 사용하면 식 (6)을 계산하는 것이 가능하다. 그런데, 이동거리를 최소화 하기 위해서는 전동기의 속도가 낮아야 하고, 또한 낮은 속도에서 측정 또는 추정된 속도는 오차를 수반하기 때문에 정밀도가 낮은 특성을 갖는다. 따라서 본 연구에서는 이동거리를 최소화하여도 엔코더의 해상도에 따른 오차 외에는 측정오차가 없는 이동거리를 이용하여 수치해석을 하도록 하기 때문에 초기 자극위치를 높은 정도로 추정하는 것이 가능하다.

Secant method의 수렴조건은 식 (4)의 추력에 대한 함수 값이 영 근처의 일정 범위 내로 수렴하는 것과 2개의 추정된 자극위치의 차이가 일정 범위 내로 수렴하는 2가지이다. 본 연구에서는 전류를 단계적으로 증가시키기 위한 수렴조건으로 추력에 비례하는 이동거리가 일정 범위 내로 수렴하면 그림 3과 같이 전류를 증가시킨 후 계속 추정을 하고, 시험전류가 최대 시험전류가 된 후에 이동거리가 수렴조건을 만족한 상태에서 자극위치 차이가 수렴하면 추정을 완료한다. 또한 이 때 추정된 초기 자극위치에 따른 추정 d축은 전동기의 (+d)축 또는 (-d)축이다. 그러므로 미소한 양의 시험전류를 추정 q축에 인가하여 측정된 이동거리가 양의 값이면 추정 d축이 전동기의 (+d)축이고, 음이면 (-d)축이므로 추정 d축이 실제 전동기의 d축이 되도록 보정한 후에 추정을 완료한다.

한편 앞에서 살펴본 바와 같이 추력 외의 전동기의 상태가 모두 같을 때 이동거리가 추력에 비례하는 관계가 성립하기 때문에 식 (6)을 평가하기 위한 이동거리는 같은 초기 조건에서 구하는 것이 바람직하다. 따라서 본 연구에서는 시험전류를 인가하여 이동거리를 측정하고, 다음 시험전류를 인가하기 전에 같은 크기의 음(-)의 전류를 인가하여 전동기의 위치를 초기위치로 되돌려 같은 초기 조건을 갖도록 한다. 이는 또한 이동거리를 최소화하는 방법이기도 하다. 그리고, 이와 같이 이동거리를 이용하고 시험전류를 점차적으로 증가하며 같은 초

기조건을 갖도록 하면 식 (8)에서 비록 외란이 있더라도 강인한 추정특성을 얻을 수 있다. 아울러 추정기간에 발생하는 소음을 최소화 하고자 시험전류로 양의 정현파 전류를 사용한다.

그림 3은 제안한 초기 자극위치 추정을 나타내는 순서도이다.

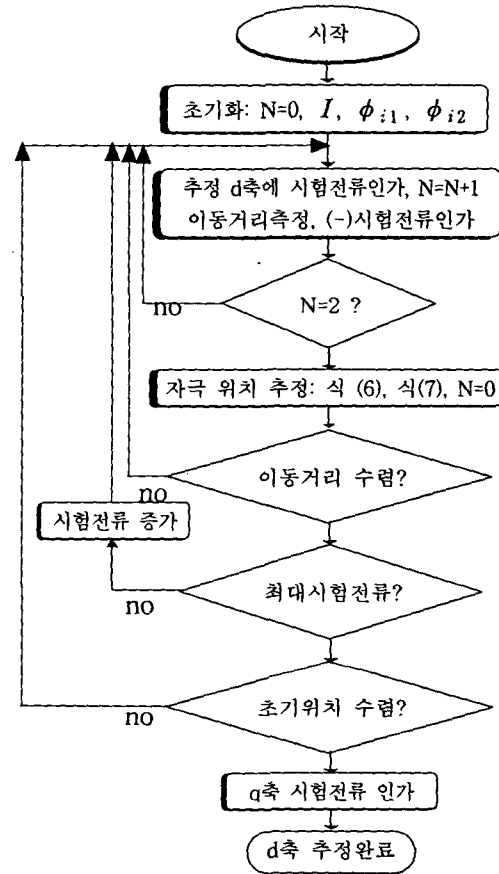


그림 3 초기 자극위치 추정 순서도

Fig. 3 Flow chart of the initial pole position estimation

### 3. 초기 자극위치 추정 실험 결과

제안한 PMSM의 초기 자극위치 추정 방법의 타당성을 검증하기 위하여 홀센서를 장착한 표 1의 회전형 전동기와 표 2의 선형 전동기에 대한 실험을 한다. 회전형 전동기에 사용한 증분형 엔코더 펄스 수는 2500[ppr]이고, 선형 전동기에 사용한 Linear Scale의 분해능은 1[ $\mu$ m/pulse]이다. 제어장치는 상용 서보 드라이브로서 홀센서 신호와 엔코더 또는 Linear Scale 신호를 입력하여 회전자의 자극 위치를 측정할 수 있다. 이렇게 측정된 자극 위치는 추정기의 추정 성능과 특성을 파악하기 위해서만 사용된다. 사용된 전류제어기는 전향보상과 Anti-Windup 기능을 가진 동기좌표계 PI제어기이다.

표 1 회전형 PMSM의 사양

Table 1 Specifications of a rotary PMSM

출력	200[W]	Rs	2.3[Ω]
전류	1.6[A]	Ls	7.8[mH]
극수	8	관성	0.017[g · m <sup>2</sup> ]
전압	200[V]	속도	3000[rpm]

표 2 선형 PMSM의 사양

Table 2 Specifications of a linear PMSM

추력	176.4[N]	Rs	2.5[Ω]
전류	4.24[A]	Ls	1.85[mH]
극수	8	질량	6[kg]
전압상수	19.6[V · s/m]	극간격	30[mm]

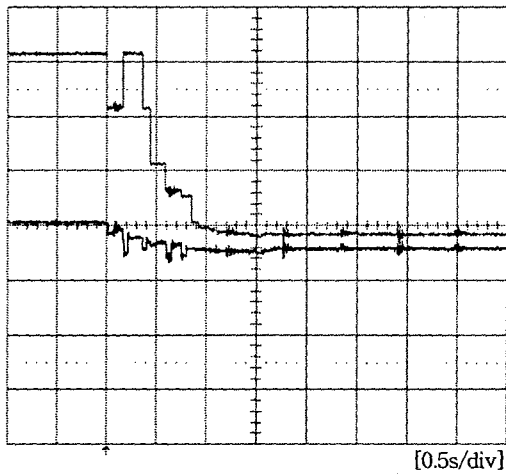


그림 4 회전형 PMSM의 추정 파형 (위: 추정오차 각도 [20°/div], 아래: 이동거리[10°/div])

Fig. 4 Estimation waveform of a rotary PMSM (upper: estimation error angle[20°/div], lower: moving distance[10°/div])

표 3 회전형 PMSM의 추정 특성

Table 3 Estimation properties of a rotary PMSM

초기각도	추정오차	추정시간	최대변위
4.8°	-1.8°	2.0[s]	0.9°
33.8°	-0.6°	1.8[s]	-14.2°
63.2°	-2.6°	1.7[s]	-6.4°
95.0°	-1.1°	3.9[s]	-14.4°
120.0°	0.3°	2.5[s]	-4.7°
161.0°	-1.6°	4.0[s]	-49.3°
-34.2°	-1.6°	2.2[s]	-2.8°
-59.2°	-1.4°	4.5[s]	56.7°
-105.6°	0.3°	3.5[s]	59.0°
-128.6°	-0.6°	3.7[s]	46.7°
-148.8°	-0.9°	1.8[s]	-14.3°
-170.4°	-0.8°	1.2[s]	-2.6°

표 4 회전형 PMSM의 추정 정밀도

Table 4 Estimation accuracy of a rotary PMSM

초기각도	추정오차	초기각도	추정오차
31°	6°	-124°	-2°
16°	-2°	160°	3°
170°	-1°	-58°	3°
38°	0°	-94°	0°
-57°	1°	117°	4°
-21°	0°	137°	2°
153°	0°	168°	0°
164°	4°	31°	-1°
151°	5°	-65°	-1°

그림 4는 회전형 PMSM에서 초기 자극위치 63.2°에 대한 추정 실험파형으로 초기각 추정오차의 수렴특성과 추정기간의 이동거리를 나타낸다. 표 3은 회전형 PMSM에 대한 추정 특성으로 평균 초기각 추정오차는 전기각 ±1.1°이고, 평균 추정시간은 2.7[s]이며, 평균 최대 이동거리는 전기각 22.7°로서 우수한 추정 성능을 보여준다. 표 4는 서보모터를 선형 볼스크류에 장착한 상태에서 부하를 포함한 전체 관성이 전동기 관성의 약 4배인 경우에 대한 추정 정밀도를 나타낸 것으로 평균 추정오차는 전기각 ±1.94°이다.

그림 5는 선형 평판 가동코일형 PMSM에서 초기 자극위치 56.5°에 대한 추정 실험파형으로 초기각 추정오차의 수렴특성과 추정기간의 이동거리를 나타낸다. 표 5는 선형 PMSM에 대한 추정 특성으로 평균 초기각 추정오차는 전기각 ±2.3°이고, 평균

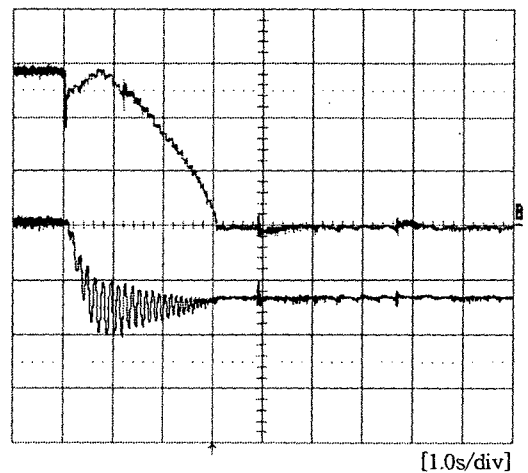


그림 5 선형 PMSM의 추정 파형 (위: 추정오차 각도 [20°/div], 아래: 이동거리[10°/div])

Fig. 5 Estimation waveforms of a linear PMSM (upper: estimation error angle[20°/div], lower: moving distance[10°/div])

표 5 선형 PMSM의 추정 특성

Table 5 Estimation properties of a linear PMSM

초기각도	추정오차	추정시간	최대변위
9.3°	-0.1°	0.8[s]	-4.0°
33.4°	-2.6°	1.8[s]	-7.7°
56.5°	-0.4°	3.1[s]	-20.0°
108.4°	-2.0°	5.3[s]	-18.2°
140.7°	-1.1°	2.0[s]	-15.5°
166.7°	3.5°	1.0[s]	-13.0°
-31.6°	-2.0°	1.4[s]	-7.3°
-61.1°	-2.2°	3.2[s]	-5.1°
-81.3°	-3.3°	5.5[s]	-12.7°
-117.4°	-2.4°	5.0[s]	-11.9°
-148.9°	-3.6°	1.5[s]	-6.7°
-177.4°	-4.2°	0.3[s]	-0.5°

추정시간은 2.6[s]이며, 평균 최대 이동거리는 전기 각 10.2°로서 우수한 추정 성능을 보여준다. 그리고, 선형 평판형 PMSM은 불균일한 유지력(Detent력)을 갖고 있으나 제안한 추정방법은 우수한 추정 성능을 나타내고 있다. 회전형 및 선형 PMSM의 초기 자극 위치 추정에 대한 위의 실험결과는 제안한 추정방법의 우수한 추정 성능을 나타내며, 초기 자극 위치 추정 요구조건을 잘 만족함을 나타낸다.

#### 4. 결 론

본 논문에서는 회전형 및 선형 영구자석 동기전 동기의 실용적인 초기 자극위치 추정방법으로서 전 동기의 자극위치에 대한 특성분석을 바탕으로 초기 자극위치 추정조건을 충족하도록 Secant Method를 적용한 추정방법을 제안하였다. 그리고, 제안한 방법은 전류제어기와 위치정보만을 사용하는 추정방법이다.

회전형 및 선형 PMSM에 대한 실험을 통하여 제안한 방법은 만족할 만한 추정시간과 이동거리 내에서 높은 초기각 추정 정도를 나타내어 초기 자극위치 추정조건을 잘 충족하는 것을 보였으며, 제안한 방법은 부하조건과 유지력에도 거의 영향을 받지 않는 우수한 추정 특성을 나타내었다.

#### 참 고 문 헌

- [1] Installation & Operational Manual : Omega Series - Digital PWM Brushless Servo Amplifiers, Glentek Inc. pp.65-68, 2002.
- [2] T. W. Kim, J. Watanabe, S. Sonoda, and J. Hirai, " Initial Pole Position Estimation of Surface PM-LSM", Journal of Power Electronics, Vol. 1, No. 1, pp.1-8, 2001, April.
- [3] D. H. Jung and I. J. Ha, "An Efficient Method for Identifying the Initial Position of a PMSM with an Incremental Encoder", IEEE Trans. on Industrial Electronics, Vol. 45, No. 4, pp. 682-685, 1998, Aug.
- [4] 이진우, "Position Control of Liner Servo Drive", 전동력용 용연구회/전력변환연구회 합동 춘계 학술발표회, pp. 1-18, 2003, May.
- [5] Curtis F. Gerald, *Applied Numerical Analysis: Second Edition*, Addison-Wesley Publishing Company, Inc. pp. 1-14, 1978.