

# Z축 선형 영구자석 동기전동기의 초기각 추정 알고리즘

이진우  
두원공과대학

## Initial Pole Position Estimation Algorithm of a Z-Axis PMLSM

Jin-Woo Lee  
Doowon Technical College

### ABSTRACT

This paper deals with the estimation method on the initial pole position of a z-axis permanent magnet linear synchronous motor(PMLSM) without magnetic pole sensors such as Hall sensors. The proposed method takes account of the z-axis conditions such as the gravitational force and also the load conditions. The algorithm consists of two steps. The first step is to estimate the initial q-axis approximately by monitoring the movements at predefined different test q-axes. The second step is to estimate the real q-axis as accurately as possible based on the results at three different test q-axes. Experimental results on the z-axis PMLSM show good estimation characteristics of the proposed method.

### 1. 서론

최근 고성능 서보제어에 사용되는 선형 영구자석 동기전동기의 백터제어를 위해서는 자극위치에 대한 정확한 정보가 필요하다. 따라서 대부분의 상용 서보 모터는 서보제어를 위한 고분해능 엔코더(encoder)와 자극위치 검출을 위한 홀센서(Hall Sensor)를 사용한다. 홀센서를 사용하면 초기 자극위치를 전기각으로  $\pm 30^\circ$  오차범위 내로 추정 가능하며, 이 추정각도를 이용하여 제어를 시작한 후에 새로운 홀센서 신호가 입력되면 정확한 자극위치를 이용하여 제어한다<sup>[1]</sup>. 그러나 자극위치 센서를 사용하지 않는 것이 가격, 부피, 신뢰성 등의 면에서 유리하므로 적절한 방법으로 자극위치 정보를 얻기 위한 연구가 진행되고 있다<sup>[1]~[6]</sup>. 또한 기구적으로 홀센서를 장착하기 어려운 샤프트(shaft) 리니어 모터의 경우에는 초기각 추정 기능이 절실히 요구된다.

기존의 자극위치를 찾는 방법으로 일정 직류전류를 인가하는 방법<sup>[1]</sup>, 전기각  $90^\circ$ 의 위상차를 가진 2개의 전류 값을 이용하는 방법<sup>[2]</sup>, 작은 정현파 위치지령을 인가한 상태에서 정상상태 응답을 이용하여 초기 자극위치를 추정하는 방법<sup>[3]</sup>, 수치해석법인 이분법(bisection method)을 이용하여 자극위치를 추정하는 Dither Commutation Initialization 방법<sup>[1]</sup>, D축을 기준으로  $\pm 45^\circ$  위치에서 발생하는 추력의 크기가 같다는 개념을 이용하는 방법<sup>[4]</sup>, 할선법(secant method)을 적용하여 추력이 영인 자극위치를 추정하는 방법<sup>[5]</sup>, 전기각  $90^\circ$ 의 위상차를 가진 2축에서 발

생하는 추력을 이용하는 방법<sup>[6]</sup>이 제시되었다. 그러나 기존의 연구에서는 Z축 전동기에 대한 언급이 없으며, 이 부분에 대한 연구결과는 보고 되지 않은 것으로 보인다.

본 논문에서는 Z축 PMLSM 전동기의 초기각 추정을 위하여 먼저 Z축의 특성을 고려한 초기각 1차 추정방법을 제시하고, 1차 추정 초기각을 초기치로 하여 정밀한 초기각 추정이 가능하고 부하의 영향을 받지 않는 초기각 2차 추정방법을 제시하며, 실험을 통하여 제안한 방법의 타당성과 유용성을 보이 고자 한다.

### 2. Z축 PMLSM의 초기 자극위치 추정

#### 2.1 초기각 1차 추정방법

그림 1은 Z축에 장착되어 사용되는 PMLSM 전동기의 초기 위치를 나타낸 것으로  $Z = 0$ 에 위치해 있기 때문에 양의 Z축 방향으로의 이동이 가능하나 음의 방향으로의 이동이 불가능하다. 또한, 전동기 가동부의 자체하중에 의한 힘( $F_g$ )이 그림 1과 같이 작용하고 있기 때문에 양의 Z축 방향으로 전동기가 움직 이기 위해서는 전동기에서 발생하는 추력이  $F_g$ 보다 커야 한다.

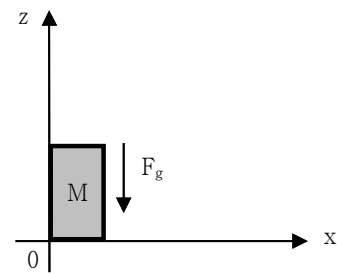


그림 1 Z축 PMLSM의 초기위치

그림 2는 자극기준 동기좌표계 상에서 일정 전류를 정지한 전동기에 인가할 때 자극위치에 따라 발생하는 전동기의 추력  $F$ 와 그림 1의  $F_g$ 를 나타낸 것이다. 한편, 그림 1과 같이  $Z = 0$ 에 위치한 전동기의 초기 자극위치는 전동기 구조 및 기계적인 부착 방법에 따라 결정되며, 그림 2의 자극위치 범위 내에서 임의의 자극위치를 가질 수 있기 때문에 전동기의 효과적인 추력제어를 위해서는 초기 자극위치를 적절하게 추정 또는 측정하는 방법이 요구된다. 그리고 Z축에 사용되는 전동기는 가동부의 자체하중에 의해서 항상 영보다 큰 힘  $F_g$ 가 그림 2와 같이 작용하고 있고, 또한 전동기가 양의 Z축 상에서만 움직일

수 있기 때문에 이를 고려한 Z축 전동기에 대한 자극위치 초기 각 추정 알고리즘이 필요하다.

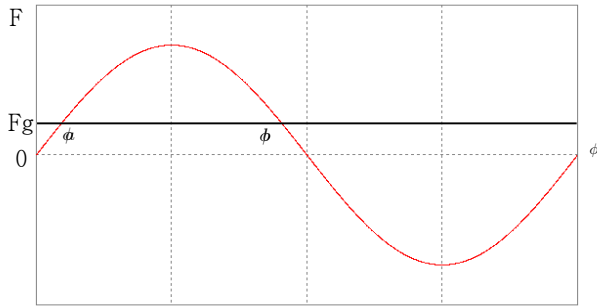


그림 2 일정전류에 대한 자극위치에 따른 Z축 PMLSM의 추력과 자체하중에 의한 힘( $F_g$ )

그림 2에서 자극기준 동기좌표계 d축과 q축의 위치는 각각  $\phi = 0$ ,  $\phi = \pi/2$  인 자극위치이다. 초기 자극위치를 알 수 없는 영구자석 동기전동기가 그림 1의 초기위치에 있는 경우 양의 Z축으로 움직일 수 있는 자극기준 동기좌표계 추정  $\hat{q}$  축의 위치는 그림 2에서 자극위치  $\phi_a < \phi < \phi_b$  구간이며, 초기의 추정  $\hat{q}$  축의 자극위치는 이 범위 내에서 설정되어야 한다.

그림 2에서 전동기 q축을 기준으로 임의의  $\pm \alpha/2$  의 위치에서 발생하는 추력의 크기는 서로 같다. 따라서 같은 추력이 발생하는 두 자극위치( $\phi_1, \phi_2$ )를  $\phi_a < \phi < \phi_b$  의 자극위치 범위 내에서 구하면 전동기 q축의 정확한 자극위치는 항상 식 (1)과 같이 구할 수 있으므로 이 원리를 적용하여 초기 자극위치를 추정하기로 한다.

$$\hat{q}_i = (\phi_1 + \phi_2) / 2 \quad (1)$$

먼저 그림 2의 자극위치에 대한 추력특성을 바탕으로 근사적인 자극위치  $\hat{\phi}_a, \hat{\phi}_b$  를 구하고, 자극기준 동기좌표계 추정  $\hat{q}$  축의 초기 자극위치를 식 (2)와 같이 구한다.

$$\hat{\phi}_i = (\phi_a + \phi_b) / 2 \quad (2)$$

식 (2)에 의한 추정  $\hat{q}$  축과 실제 전동기 q축의 관계를 나타내면 그림 3과 같으며, 초기 추정  $\hat{q}$  축으로부터 전동기 q축을 추정하는 2차 추정방법은 다음과 같다.

### 2.2 초기각 2차 추정방법

그림 3의 좌표계에 표시한 추정  $\hat{q}$  축을 기준으로  $\alpha/2$  의 위치에 있는  $\hat{a}$  축에 시험전류를 인가하여 발생 추력  $f_a$ 를 구하고,  $-\alpha/2$  의 위치에 있는  $\hat{b}$  축에 시험전류를 인가하여 발생 추력  $f_b$ 를 구한다. 그리고  $\hat{b}$  축에 대해서 기지의  $\delta$  각만큼 앞선  $\hat{c}$  축에 시험전류를 인가하여 발생 추력  $f_c$ 를 구한다. 초기각과 추력의 관계로부터 새로운 추정  $\hat{q}$  축은 다음과 같이 구할 수 있다.

$$\hat{\phi}_i^{(k+1)} = \hat{\phi}_i^{(k)} + \frac{\delta f_a - f_b}{2f_c - f_b} \quad (3)$$

식 (3)에서 두 번째 항의 보정 값은 상대적인 추력 차이의

비에 의해서 값이 결정되기 때문에 초기각 추정시 전동기 부하의 영향을 거의 받지 않는 장점을 가진다.

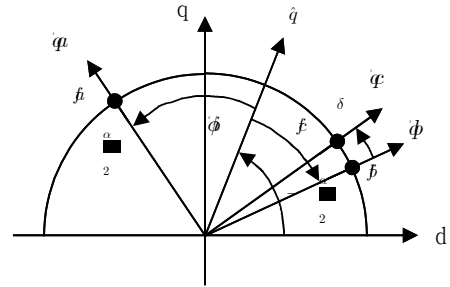


그림 3 Z축 PMLSM의 초기각 추정을 위한 동기좌표계

한편, 식 (3)에서 전동기의 발생추력을 사용하고 있으나, 별도의 센서를 사용하여 추력을 측정하지 않는 경우에는 초기 자극위치를 모르기 때문에 전동기 발생추력을 구할 수 없으나, 논문 [5]의 방법을 사용하면 전동기 동적방정식으로부터 추력에 대응하는 값을 구하는 것이 가능하므로 이 방법을 적용하여 추정하기로 한다. 그리고 식 (3)의 두 번째 항이 일정범위내로 수렴하면 초기각 추정을 완료하도록 한다.

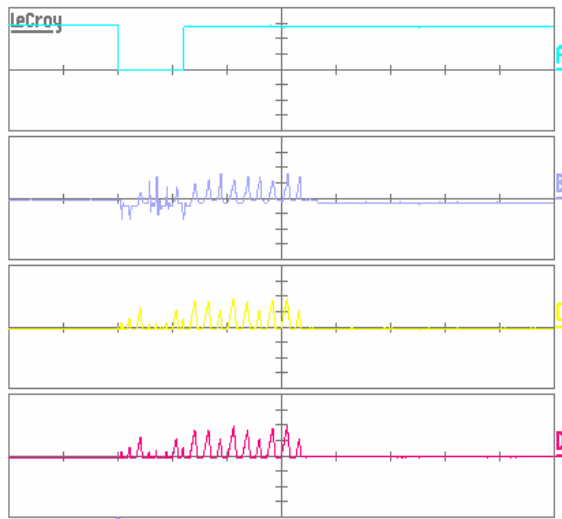
## 3. Z축 초기각 추정 실험 결과 및 고찰

제안한 Z축 PMLSM의 초기 자극위치 추정 방법의 타당성을 검증하기 위하여 실험에 사용한 PMLSM 및 Linear Scale의 사양은 표 1과 같으며, TI사의 120[MHz] TMS320VC33 DSP를 사용한 제어장치의 전류제어 주기는 50[μs]이고, IGBT 인버터의 스위칭주기는 100[μs]이며, 전류제어기 대역폭은 13,000 [rad/s]이다.

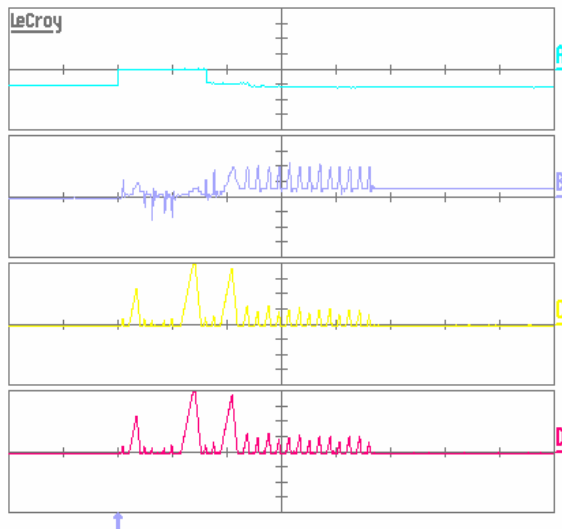
표 1 PMLSM 및 Linear Scale의 사양

정격추력	84.5[N]	Rs	3.79[Ω]
정격전류	2[Arms]	Ls	13.45[mH]
극수	8	가동자	2.66[kg]
추력상수	42.25[N/Arms]	극간격	12[mm]
Linear Scale : 1[μm/pulse]			

그림 4는 무부하 상태의 Z축 PMLSM에서 초기 자극위치가 각각 전기각 142.5°와 -50.3°에 대한 추정과정을 실험파형으로 나타낸 것이며, 그림 5는 부하 상태에서의 초기 자극위치가 각각 전기각 138.1°와 -59.1°에 대한 실험파형이다. 실험파형은 초기에 홀센서에 의한 초기각을 나타내고 있으며, 전류가 인가되는 구간이 1차/2차 추정 구간이며, 1차 추정구간은 자극위치 값이 영인 구간이며, 1차 추정 후 2차 추정 구간에서 추정치가 제한 범위 내로 수렴하면 추정을 완료한다. 자극위치파형 A로부터 추정 자극위치와 초기 자극위치가 잘 일치함을 알 수 있으며, 이동거리파형 B로부터 추정 구간에서 이동거리가 약 ±10 μm 이내로 매우 적은 것을 알 수 있다. 따라서 제안한 방법에 의하여 Z축 PMLSM의 초기각을 부하조건에 관계없이 짧은 이동거리 내에서 잘 추정함을 알 수 있다.

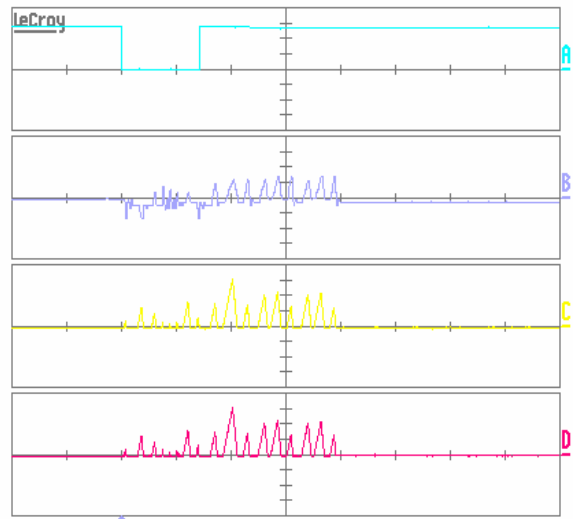


(a) 초기각 142.5°

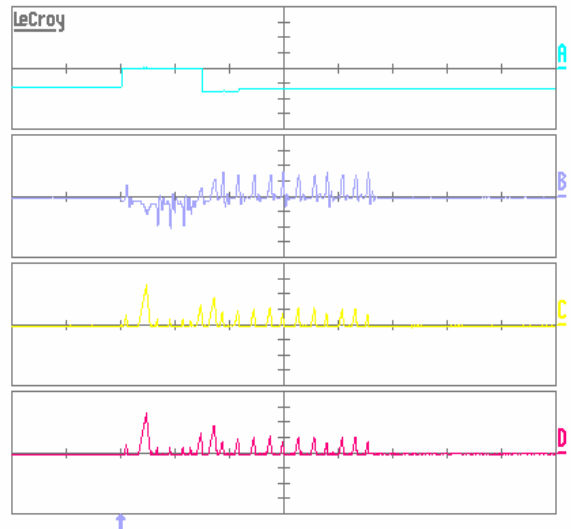


(b) 초기각 -50.3°

그림 4 무부하시 Z축 PMLSM의 초기각 추정 파형 (A: 자극위치[50°/div], B: 이동거리[5μm/div], C: Iqse\_ref [1A/div], D: Iqse[1A/div], 시간[0.2s/div])



(a) 초기각 138.1°



(b) 초기각 -59.1°

그림 5 부하시 Z축 PMLSM의 초기각 추정 파형 (A: 자극위치 [50°/div], B: 이동거리[5μm/div], C: Iqse\_ref [1A/div], D: Iqse[1A/div], 시간[0.2s/div])

#### 4. 결론

본 논문에서는 새로운 Z축 PMLSM의 초기각 추정방법으로 Z축의 제한 조건을 고려하고, 부하상태에 영향을 받지 않는 추정 방법을 제시하였으며, 실험을 통하여 부하상태에 관계없이 짧은 이동거리 내에서 초기각을 정밀하게 추정할 수 있음을 검증하였다.

#### 참고 문헌

[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] Choi J.-W., Yun W.-E. and Kim H.-G., "Initial pole-position estimation of linear motor", IEE Proceedings of Electric Power Applications, Vol. 152, No. 4, pp. 997–1002, 2005, July  
 [5] J. W. Lee, "A Novel Method of Estimating an Initial Magnetic Pole Position of a PMSM", IEEE Proceedings of PESC, pp. 702–707, 2006, June.  
 [6] K. Ide, H. S. Song, M. Takaki, S. Morimoto, and S. K. Sul, "Fast Initial Pole-Position Estimation for Non-Salient PM-LSM based on Agreement of Two Reference Frames", IEEE Proceedings of PESC, pp. 1497–1503, 2006, June.