

PMLSM의 개선된 초기 자극위치 추정방법

이진우

두원공과대학 메카트로닉스과, jinwoo@doowon.ac.kr

Advanced Method for an Initial Pole Position Estimation of a PMLSM

Jin-Woo Lee

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

ABSTRACT

This paper presents an advanced method for an initial pole position estimation of a PMLSM (Permanent Magnet Linear Synchronous Motor) that has an incremental encoder for servo applications but does not have Hall sensors as a magnetic pole sensor. The proposed algorithm finds either of two zero force positions and then the correct d-axis by appropriately using the secant method as a numerical method. It only requires the tuned current controller and the relative position information and so it can be simply applicable to a rotary PMSM. The experimental results show the validity of the proposed method with respect to accurate pole position estimation under the minimal moving distance during estimation process.

1. 서론

서보 응용분야에 사용되는 선형 영구자석 동기전 동기의 고정도 제어를 위해서는 회전자 위치 및 자극위치에 대한 정확한 정보가 반드시 필요하다. 따라서 대부분의 상용 서보 모터는 고분해능 엔코더(encoder)와 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.^[1] 그러나, 자극위치 센서를 사용하지 않는 것이 가격, 부피, 신뢰성 등의 면에서 유리하므로 적절한 방법으로 자극위치 정보를 얻기 위한 연구가 진행되고 있다.^{[1]-[5]} 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.^[1] 한편 전기각 90° 의 위상차를 가진 2개의 전류 값을 이용하는 방법은 동일 속도에서 추력이 같다는 개념을 이용하므로 속도제어가 요구되어 적용에 제한을 받는다.^[2] 그리고, 작은 정현파 위치지령을 인가한 상태에서 정상상태 응답을 이용하여 초기 자극위치를 추정하는 방법은 위치제어가 요구되어 역시 적용에 제한을 받는다.^[3] Dither Commutation Initialization 방법은 수치해석법인 이분법(bisection method)을 이용하여 자극위치를 추정하는 것으로 시험 전류의 크기는 진동과 수렴 정밀도를 고려하여 설정한다.^[1] 그리고, D축을 기준으로 $\pm 45^\circ$ 위치에서 발생하는 추력의 크기가 같다는 개념을 이용하는 방법은 시뮬레이션결과만 제시하고 있다.^[4] 또한, 할선법(secant method)을 적용한 방법은 두 번의 동일 인가전류에 대한 이동거리를 이용하기 때문에 이동거리가 가변적인 단점이 있다.^[5]

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

본 논문에서는 이러한 요구조건을 고려한 초기 자극위치 추정 방법으로 할선법을 적용하는데 있어서 이동거리를 일정범위내로 제한할 수 있도록 하는 방법을 제안하고, 이를 적용하여 전동기의 추력이 영이 되는 위치를 추정하는 방법을 제안한다. 그리고 선형 동기전동기에 대한 실험을 통하여 제안한 방법의 타당성과 유용성을 보이고자 한다.

2. PMLSM의 자극위치 추정

PMLSM의 초기 자극위치 추정과 관련하여 먼저 전동기의 자극위치에 대한 추력 특성을 분석하고,

이를 바탕으로 추정 요구조건을 만족하는 추정방법을 제안하고자 한다.

2.1 PMLSM의 자극위치에 따른 추력 특성

PMLSM의 추력(F)은 식 (1)과 같이 나타낼 수 있다.^[6]

$$F = \frac{3}{2} \frac{\pi}{\tau} \lambda_f I_{qse} \quad [N] \quad (1)$$

여기서, τ : 선형 전동기의 극간격, λ_f : 영구자석에 의한 자속, I_{qse} : 동기좌표계 q축 전류이다.

선형 동기전동기의 추력은 식 (1)과 같이 전동기의 동기좌표계 q축 전류에 비례한다. 그림 1은 실제 전동기의 동기좌표계(dq_{real})에 대한 추정 동기좌표계(dq_{est})의 관계를 나타낸 것이며, 각도 ϕ_i 는 초기 회전자 자극위치에 따라 정해지는 초기각이다. 이 초기각에 대한 정확한 정보는 PMLSM의 정밀한 q축 전류제어를 위해 반드시 필요하다.

그림 1과 같이 추정 d축에 전류(I)를 인가하면 전동기의 q축 전류는 식 (2)와 같이 초기각의 정현파 함수가 되고, 또한 추력도 초기각의 정현파 함수가 된다.

$$I_{qse} = I \cdot \sin \phi_i \quad (2)$$

식 (2)를 식 (1)에 대입하여 추력을 구하면 식 (3)과 같으며, 그림 2는 식 (3)의 추력을 나타낸 것이다.

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

그림 2에서 추정 d축 전류에 대하여 추력은 초기각 $\pm 90^\circ$ 에서 크기가 최대이고, 0° 와 $\pm 180^\circ$ 에서 영의 값을

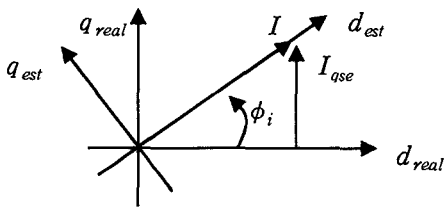


그림 1 동기좌표계상의 초기 자극위치

Fig. 1 Initial pole position in the synchronous reference frame

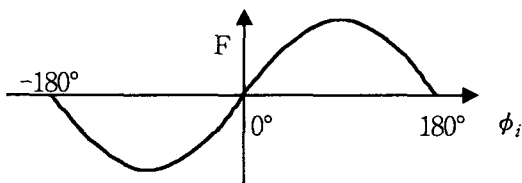


그림 2 전기각도로 나타낸 초기 자극위치에 대한 추력

Fig. 2 Thrust force with respect to the electrical angle for a given initial pole position

가진다. 따라서 추력이 영이거나 최대 크기인 상태를 찾으면 초기각에 대한 값을 추정할 수 있다.

2.2 할선법에 의한 자극위치 추정

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

먼저, 식 (3)의 추력에 대하여 ϕ_i 에 대한 미분을 취하면 식 (4)와 같다.

$$\frac{dF}{d\phi_i} = \frac{3}{2} \frac{\pi}{\tau} \lambda_f I \cdot \cos \phi_i \quad (4)$$

식 (4)는 ϕ_i 에 대한 추력 민감도로서 그림 2에서 추력이 영인 $\phi_i = 0^\circ, \pm 180^\circ$ 에서 민감도 크기가 최대이고, 추력의 크기가 최대인 $\phi_i = \pm 90^\circ$ 에서 민감도는 영이다. 따라서 추력의 크기가 최대인 $\phi_i = \pm 90^\circ$ 를 추정하는 경우에 이 부근에서 민감도가 작아 높은 추정 정밀도를 얻는 것이 곤란하다. 반면에 추력이 영인 $\phi_i = 0^\circ, \pm 180^\circ$ 를 추정하는 경우에는 이 부근에서 민감도가 크기 때문에 높은 추정 정밀도를 얻는 것이 가능하므로 본 논문에서는 그림 2의 추력이 영인 상태를 추정하도록 한다. 이를 추정하기 위한 수치해석법으로는 수렴성이 우수하고 함수 값이 영인 상태를 추정할 수 있는 할선법(secant method)^[7]을 적용하도록 한다.

주어진 임의의 초기각 ϕ_{i1}, ϕ_{i2} 에 대하여 식 (3)에 의한 추력이 F_1, F_2 일 때 할선법에 의한 추정 초기각 ϕ_{i3} 은 식 (5)와 같다.

$$\phi_{i3} = \phi_{i2} - F_2 \cdot \frac{\phi_{i2} - \phi_{i1}}{F_2 - F_1} \quad (5)$$

한편, 다음 스텝에서의 추정을 위한 초기각은 식 (6)과 같이 수정된 초기각을 사용한다.

$$\phi_{i1} = \phi_{i2}, \quad \phi_{i2} = \phi_{i3} \quad (6)$$

한편, 할선법을 적용하기 위해서는 식 (5)를 계산하기 위한 추력 값이 필요하다. 그러나 추력은 식 (3)에서 전동기 상수와 회전자 자극 위치를 알아야 하기 때문에 자극위치를 모르는 상태에서는 필요한 추력 값을 얻을 수 없으므로 다른 방법이 요구된다.

선형 전동기의 기계적인 동적 방정식은 일반적으로 식 (7)과 같이 나타낼 수 있다.

$$F = m \frac{dv}{dt} + B \cdot v + F_d \quad (7)$$

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

식 (7)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 (5)를 계산하는 것이 가능하다. 그런데, 이동거리를 최소화하기 위해서는 전동기의 속도가 낮아야 하고, 또한 낮은 속도에서 측정 또는 추정된 속도는 오차를 수반하기 때문에 정밀도가 낮은 특성을 갖는다. 따라서 본 논문에서는 이동거리를 최소화하여도 엔코더의 해상도에 따른 오차 외에는 측정오차가 없는 이동거리를 사용한 수치해석을 하도록 하여 초기 자극위치를 높은 정도로 추정할 수 있도록 한다.

한편, 식 (4)에서 민감도는 추정 d축 시험전류 (I)의 크기에 비례하므로 민감도를 증가시키기 위해서는 큰 전류를 인가하는 것이 필요하다. 그러나 초기에 ϕ_i 의 값을 모르는 상태에서 큰 전류를 인가하면 식 (3)에 의한 큰 추력이 발생하고 가동자가 크게 움직일 수 있다. 따라서 이를 피하기 위해

본 논문에서는 그림 3에 나타낸 것과 같이 목표위치에 도달할 때까지 시험전류를 단조 증가시키면서 이동거리를 측정한다. 목표위치에 도달하면 전류를 영으로 하고 시험전류 인가시간과 이동거리를 측정한다. 이 경우에 추력은 이동거리를 시간으로 나눈 값에 비례하므로 이 값을 이용하여 식 (5)를 계산한다. 이와 같이 하면 이동거리를 목표위치로 제한할 수 있으며, 전류크기 및 인가시간을 동시에 자동으로 설정할 수 있는 장점이 있다. 그리고 민감도를 높이기 위한 전류크기 증가도 추정치가 수렴하면서 자연스럽게 증가하게 되므로 높은 초기값 추정 정밀도를 얻을 수 있다. 여기서 시험전류의 최대치는 전동기의 허용전류로 결정할 수 있다.

할선법의 수렴조건은 식 (3)의 추력에 대한 함수 값이 영 근처의 일정 범위 내로 수렴하는 것과 2개의 추정된 자극위치의 차이가 일정 범위 내로 수렴하는 2가지이다. 본 논문에서는 시험전류가 추정치가 수렴하면서 증가하기 때문에 그림 3과 같이 자극위치 차이가 수렴하면 추정을 완료하도록 한다. 또한 이 때 추정된 초기 자극위치에 따른 추정 d축은 전동기의 양(+) 또는 음(-)의 d축이다. 그러므로 미소한 양의 시험전류를 추정 q축에 인가하여 측정된 이동거리가 양의 값이면 추정 d축이 전동기의 양(+)의 d축이고, 음이면 음(-)의 d축이므로 추정 d축이 실제 전동기의 d축이 되도록 보정한 후에 추정을 완료한다.

그림 3은 제안한 초기 자극위치 추정을 나타내는 순서도이다.

3. 자극위치 추정 실험 결과

제안한 PMLSM의 초기 자극위치 추정 방법의 타당성을 검증하기 위하여 사용한 선형 평판 가동 코일형 영구자석 동기전동기의 사양은 표 1과 같다. 전동기에 장착한 Linear Scale의 분해능은 $1[\mu\text{m}/\text{pulse}]$ 이며, 또한 전동기는 자극위치를 검출할 수 있는 홀센서도 장착하고 있다. DSP를 사용한 제어장치는 Linear Scale 신호와 홀센서 신호를 입력하여 회전자의 자극위치를 측정하며, D/A 출력포트와 디지털 출력용 LED표시장치를 갖고 있다. 측정된 자극위치는 추정기의 추정 성능과 특성을 파악

표 1 PMLSM의 사양

Table 1 Specifications of a PMLSM

| | | | |
|------|---------------|-------|-----------------|
| 정격추력 | 176.4[N] | R_s | 2.5[Ω] |
| 정격전류 | 4.24[A] | L_s | 1.85[mH] |
| 극수 | 8 | 질량 | 6[kg] |
| 전압상수 | 19.6[V · s/m] | 극간격 | 30[mm] |

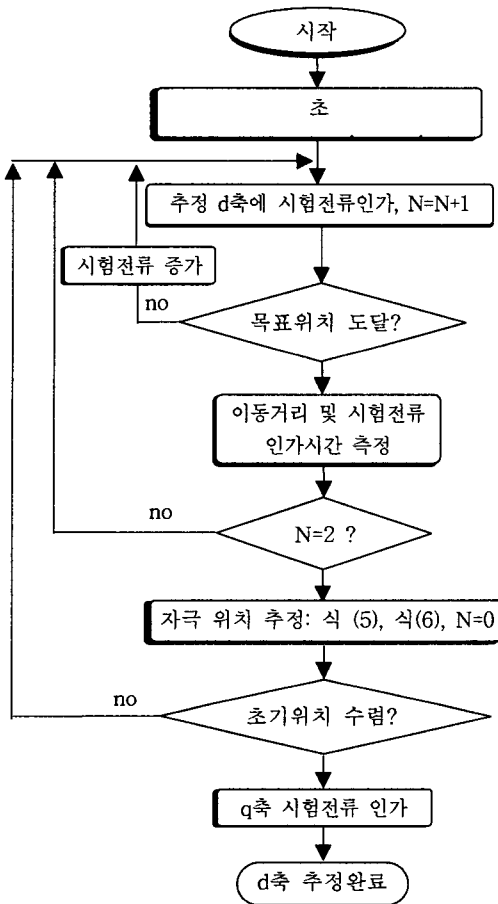
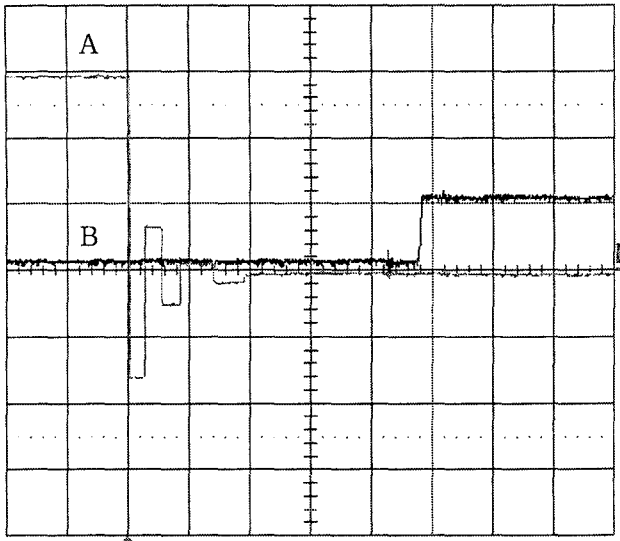


그림 3 초기 자극위치 추정 순서도

Fig. 3 Flow chart of the initial pole position estimation



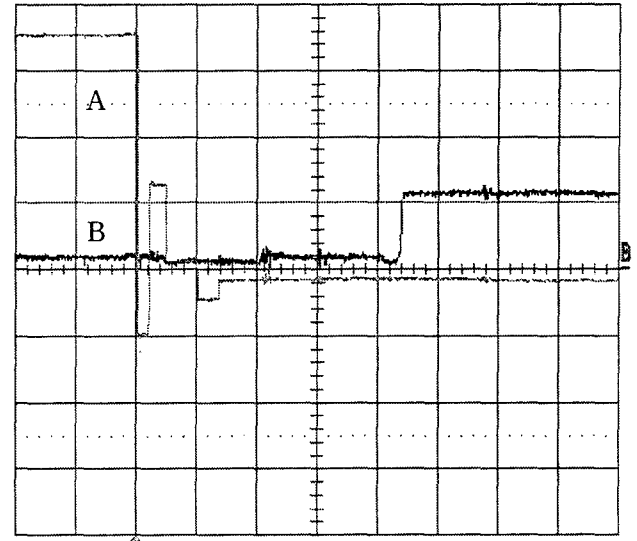
[0.2s/div]

그림 4 무부하시 PMLSM의 추정 파형 (파형 A: 추정오차 [20°/div], 파형 B: 이동거리[0.5°/div])

Fig. 4 Estimation waveforms of a PMLSM at no-load (trace A: estimation error [20°/div], trace B: moving distance [0.5°/div])

하기 위해서만 사용한다. 그리고 채택한 전류제어기는 전향보상과 Anti-Windup 기능을 가진 동기 좌표계 PI제어기이다.

그림 4는 선형 평판 가동 코일형 PMSM에서 무부하 상태의 초기 자극위치가 전기각 57.6°인 경우에 대한 추정과정을 실험파형으로 나타낸 것이며, 초기각 추정오차의 수렴특성과 추정기간의 가동자의 이동거리를 각각 전기각으로 나타낸 것이다. 그림 5는 11[kg]의 부하를 가동자에 장착한 상태에서 초기 자극위치가 전기각 70.0°인 경우에 대한 추정과정을 실험파형으로 나타낸 것으로 무부하 상태와 유사한 특성을 각각 보인다. 제안한 방법을 적용한 실험에서 목표위치는 신뢰할 수 있는 최소거리로 3[μm]을 설정하였으며, d축의 판정에는 전기각 0.5°를 사용하였다. 이러한 조건에서 그림 4와 그림 5는 부하 조건에 거의 영향을 받지 않는 할선법에 의한 빠른 추정특성을 보여준다. 표 2는 초기각에 따른 무부하 PMLSM에 대한 추정 특성을 나타낸 것이며, 초기각 추정오차의 평균값은 전기각 -2.3°이고, 최대 이동거리의 평균값은 전기각 $\pm 0.5^\circ$ 이며, 평균 추정시간은 1.0[s]로서 우수한 추정 성능을 보여준다. 표 3은 부하시의 추정 특성으로 초기각 추정오차의 평균값은 전기각 $\pm 1.5^\circ$ 이고, 최대 이동거리의 평균값은 전기각 $\pm 0.52^\circ$ 이며, 평균 추정시간은



[0.2s/div]

그림 5 부하시 PMLSM의 추정 파형 (파형 A: 추정오차 [20°/div], 파형 B: 이동거리[0.5°/div])

Fig. 5 Estimation waveforms of a PMLSM at load (trace A: estimation error [20°/div], trace B: moving distance [0.5°/div])

1.0[s]로서 우수한 추정 성능을 보여준다. 특히 제안한 방법에서 최대 이동거리 중에서 가장 큰 값은 무부하시 0.61°(102[μm])이고, 부하시는 0.68°(113[μm])로서 이동거리가 매우 작은 것을 알 수 있다. 그리고 실험에 사용한 선형 평판형 PMSM은 불균일한 유지력(detent force)을 갖고 있으나 제안한 추정방법은 이동거리가 매우 작아서 유지력에 의한 외란이 초기각 추정에 미치는 영향이 거의 없음을 추론할 수 있다. PMLSM의 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 선형 영구자석 동기전동기의 실용적인 초기 자극위치 추정방법으로서 전동기의 자극 위치에 대한 특성분석을 바탕으로 초기 자극위치 추정조건을 충족하도록 할선법을 적용한 추정방법을 제안하였다. 그리고 제안한 방법은 전류제어기와 위치정보만을 사용하는 추정방법이다.

PMLSM에 대한 실험을 통하여 제안한 방법은 매우 짧은 이동거리 내에서 빠른 시간 내에 높은 초기각 추정 정도를 나타내어 초기 자극위치 추정조건을 잘 충족하는 것을 보였으며, 제안한 방법은 부하조건과 유지력에도 거의 영향을 받지 않는 우수한 추정 특성을 나타내었다.

표 2 무부하시 PMLSM의 추정 특성

Table 2 Estimation characteristics of a PMLSM at no-load

| 초기각도 | 추정오차 | 추정시간 | 최대변위 |
|---------|-------|--------|--------|
| 1.8° | -3.7° | 0.9[s] | 0.47° |
| 21.4° | -1.0° | 0.7[s] | 0.49° |
| 36.7° | -2.6° | 0.8[s] | 0.44° |
| 57.6° | -1.3° | 1.0[s] | 0.49° |
| 82.9° | -4.2° | 0.9[s] | 0.38° |
| 102.6° | -1.4° | 1.0[s] | -0.49° |
| 124.5° | -2.0° | 1.0[s] | -0.49° |
| 139.2° | -2.7° | 1.1[s] | -0.55° |
| 158.7° | -2.9° | 1.6[s] | -0.49° |
| 178.1° | -1.8° | 0.6[s] | -0.50° |
| -5.9° | -5.9° | 0.6[s] | 0.50° |
| -17.9° | -3.9° | 1.0[s] | 0.37° |
| -41.2° | -1.8° | 0.9[s] | 0.54° |
| -66.6° | -1.9° | 1.0[s] | 0.47° |
| -85.0° | -0.6° | 0.9[s] | 0.52° |
| -104.2° | -1.5° | 1.3[s] | -0.52° |
| -116.1° | -0.8° | 1.0[s] | -0.56° |
| -142.9° | -0.9° | 1.2[s] | -0.53° |
| -164.2° | -1.1° | 0.9[s] | -0.61° |
| -175.3° | -3.7° | 1.1[s] | -0.49° |

표 3 부하시 PMLSM의 추정 특성

Table 3 Estimation characteristics of a PMLSM at load

| 초기각도 | 추정오차 | 추정시간 | 최대변위 |
|---------|-------|--------|--------|
| 2.4° | -3.1° | 0.9[s] | 0.58° |
| 13.5° | -3.3° | 0.9[s] | 0.50° |
| 28.0° | -2.9° | 1.1[s] | 0.48° |
| 48.8° | -1.8° | 0.9[s] | 0.49° |
| 70.0° | -3.0° | 0.9[s] | 0.47° |
| 94.1° | -2.9° | 1.4[s] | -0.50° |
| 115.5° | -1.1° | 1.6[s] | -0.65° |
| 139.9° | -3.5° | 1.1[s] | -0.48° |
| 166.2° | 0.3° | 1.4[s] | -0.49° |
| 179.8° | -0.1° | 0.6[s] | -0.50° |
| -2.5° | -2.5° | 0.6[s] | 0.50° |
| -21.5° | -4.7° | 0.9[s] | 0.39° |
| -40.8° | -1.4° | 1.0[s] | 0.45° |
| -65.9° | -4.0° | 0.9[s] | 0.50° |
| -83.8° | -5.0° | 0.9[s] | 0.50° |
| -106.3° | 0.5° | 0.9[s] | -0.55° |
| -121.6° | -3.4° | 0.9[s] | -0.52° |
| -145.2° | -1.8° | 1.0[s] | -0.53° |
| -162.9° | -2.9° | 1.1[s] | -0.49° |
| -174.7° | -0.4° | 0.9[s] | -0.68° |

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] 이영호, 최중우, 김홍근, "영구자석 선형동기전동기의 초기 각 추정 알고리즘", 전력전자학회 추계학술대회 논문집, pp.104-108, 2003, 11.

[5] 이진우, "자극센서 없는 영구자석 동기전동기의 초기 자극 위치 추정", 전력전자학회 추계학술대회 논문집, pp.127-131, 2003, 11.

[6] 이진우, "Position Control of Liner Servo Drive", 전동력용용연구회/전력변환연구회 합동 춘계 학술발표회, pp.1-18, 2003, 5.

[7] Curtis F. Gerald, Applied Numerical Analysis: Second Edition, Addison-Wesley Publishing Company, Inc. pp.1-14, 1978.