

# 고주파 신호 주입을 통한 선형 전동기의 초기 자극 위치 추정 알고리즘

황채은, 이영기, 설승기  
 서울대학교 공과대학 전기정보공학부

## Initial Pole-position Identification Algorithm of Linear Motor by High-frequency Signal Injection

Chae-Eun Hwang, Younggi Lee, and Seung-Ki Sul  
 Dept. of Electrical and Computer Engineering, Seoul National University

### ABSTRACT

본 논문에서는 위치 센서 없이 영구자석 선형 전동기의 초기 자극 위치를 추정하는 알고리즘을 제안하였다. 이 알고리즘은 선형 전동기의 고주파 특성을 이용하여 초기 자극 위치를 추정한다. 정지 좌표계 상에서 고주파 전압을 주입하였을 때 유도되는 전류 데이터를 추출하여 분석한 결과, 전류 파형과 기준 신호와의 위상 차이가 자극의 위치에 따라 180도의 주기를 가지고 달라짐을 확인하였다. 이러한 위상 차이와 자극의 위치 사이의 관계를 이용하여 초기 위치를 추정할 수 있다. 제안하는 방법은 이동자의 움직임을 필요로 하지 않으므로 선형 전동기의 수직 방향 움직임을 필요로 하는 분야에서 위 센서 없는 제어에 효과적으로 사용될 수 있다. 실험을 통해 알고리즘의 타당성 및 효과를 검증하였다.

### 1. 서 론

영구자석 선형 전동기의 고정밀도 제어를 위해서는 이동자 및 자극의 위치에 대한 정확한 정보가 필요하다. 따라서, 대부분의 상용 전동기의 경우 엔코더와 홀센서를 이용하여 자극의 위치 정보를 얻는다. 그러나, 두 종류의 위치 센서는 가격과 부피 상승의 원인이 되며, 신뢰성의 문제를 야기할 수 있다. 이로 인해 홀센서를 사용하지 않으면서 자극의 초기 위치를 추정할 수 있는 방법에 대한 연구가 진행되고 있다.

선형 전동기의 초기 위치 추정과 관련된 기존의 방법들은 특정 제어 축에 지령 추력을 인가하고 나타나는 이동자의 이동거리를 측정하여 초기 위치를 추정한다.<sup>[1-3]</sup> 그러나 이와 같은 방법들은 필수적으로 전동기의 움직임을 요구하기 때문에 이동자가 고정되어 있는 경우에는 적용할 수 없다.

따라서, 본 논문에서는 이동자의 움직임을 필요로 하지 않으면서 초기 자극 위치를 추정하는 알고리즘을 제안하였다. 이 알고리즘은 전동기의 움직임을 발생하지 않을 정도의 높은 주파수를 갖는 전압을 정지 좌표계에 주입하고, 유도되는 전류 파형의 특성을 이용하여 초기 위치를 추정한다. 실제 전동기에 제안된 알고리즘을 적용하여 타당성 및 효과를 검증하였다.

## 2. 초기 자극 위치 추정 알고리즘

### 2.1. 선형 전동기의 특성 추출

#### 2.1.1. 고주파 신호 주입 시 인덕턴스 추출

선형 전동기의 전기적 특성을 영구자석의 N극에 동기된 좌표계에서 표현하면 (1)과 같다.

$$\begin{bmatrix} v_{dsh}^r \\ v_{qsh}^r \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R_{dsh} + sL_{dsh} & sL_{dqsh} \\ sL_{qdsh} & R_{qsh} + sL_{qsh} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{ds}^r \\ i_{qs}^r \end{bmatrix} \quad (1)$$

초기 위치를 추정하는 동안 이동자는 정지하고 있으므로, 이동자의 이동 속도는 무시할 수 있다. (1)을 전류에 대해

정리하면 (2)와 같다.

$$\begin{bmatrix} i_{dsh}^r \\ i_{qsh}^r \end{bmatrix} = \frac{1}{(R_{dsh} + sL_{dsh})(R_{qsh} + sL_{qsh})} \begin{bmatrix} R_{qsh} + sL_{qsh} & -sL_{dqsh} \\ -sL_{qdsh} & R_{dsh} + sL_{dsh} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} v_{dsh}^r \\ v_{qsh}^r \end{bmatrix} \quad (2)$$

식 (2)로부터 동기 좌표계의 d축과 q축에 주입된 전압과 그로부터 유도되는 전류의 관계를 알 수 있으므로,  $L_{dsh}$ ,  $L_{qsh}$ ,  $L_{dqsh}$ , 그리고  $L_{qdsh}$ 의 값을 추출할 수 있다. 이동자의 위치에 따라 계산된 인덕턴스들의 값은 그림 1과 같다.

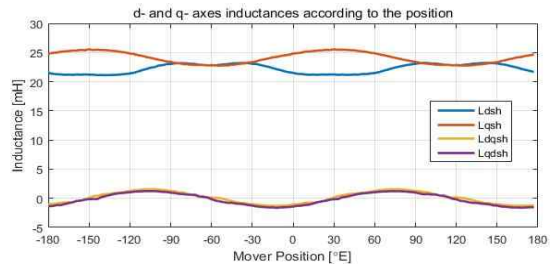


그림 1 이동자의 위치에 따른 인덕턴스

그림 1에서 이동자의 위치에 따라  $L_{dsh}$ 와  $L_{qsh}$ 의 값이 변하는 것을 알 수 있다. 전기각  $30^\circ$  ( $30^\circ E$ )와  $-150^\circ E$  부근에서는 충분한 돌극성이 보장되므로 일반적인 매입형 영구자석 전동기에서 사용되는 고주파 신호 주입 알고리즘을 적용할 수 있다.<sup>[4]</sup> 그러나  $-60^\circ E$ 와  $120^\circ E$  부근에서는 돌극성이 거의 없어 신호 주입 알고리즘을 적용할 수 없으므로, 새로운 초기 위치 추정 방법이 필요하다.

#### 2.1.2. 선형 전동기의 고주파 신호 특성 추출

이동자를 고정시킨 상태에서 정지 좌표계의  $0^\circ$ 부터  $5^\circ$  간격으로 100V, 1kHz의 전압을 인가하고, 유도되는 전류의 크기와 전압과의 위상차를 계산한다. 이동자의 위치를 이동시켜 가며 이 과정을 반복하면, 이동자의 위치와 전압을 주입하는 각도에 따른 전류의 크기 및 위상차에 대한 정보를 얻을 수 있다.

특정 이동자의 위치에서 전압을 주입하는 각도에 대한 유도된 전류의 크기는 그림 2와 같이 나타난다. 유도되는 전류는 전압을 주입하는 각도에 대해 2고조파의 형태로 나타난다. 또한, 이동자의 위치가 변화함에 따라 그래프의 위상이 달라진다.

이에 근거하여 주입하는 각도의 2배를 위상으로 갖는 기준 신호,  $S_{ref}$ 를 (3)과 같이 설정하였다. 그리고, 유도되는 전류의 크기 파형과 기준 신호와의 위상 차이는  $\Delta\theta_\phi$ 로 표기하였다.

$$S_{ref} = \cos 2\theta_s \quad (3)$$

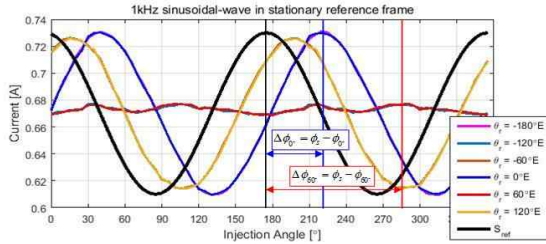


그림 2 이동자의 위치에 따른 유도되는 전류의 크기

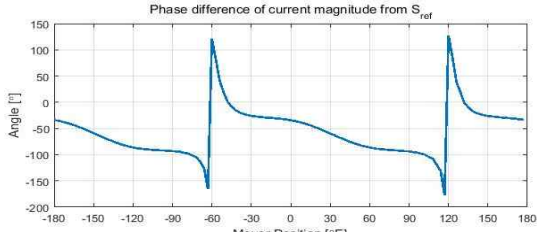


그림 3 이동자의 위치에 따른 위상 차이

그림 3은 이동자의 위치와 기준 신호와의 위상 차이를 나타낸다. 기준 신호와의 위상 차이는 이동자의 전기각 한 주기 동안 2번 반복된다. 또한, 이동자의 위치가  $-60^\circ\text{E}$  부터  $117^\circ\text{E}$  까지 그래프가 단조 감소의 형태로 나타나는 것을 알 수 있다. 즉, 이동자의 위치와 위상 차이와의 관계가 일대일 대응이므로 이러한 관계를 초기 위치 추정에 이용할 수 있다.

## 2.2. 선형 전동기의 초기 자극 위치 추정

선형 전동기의 초기 자극 위치 추정을 위해 제안하는 알고리즘은 고주파 신호 주입을 통해 얻은 그림 3의 특성을 이용한다. 즉, 주어진 이동자의 초기 위치에서 고주파 전압 주입을 통해 추출한 전류와 기준 신호,  $S_{ref}$ , 사이의 위상 차이를 계산한 후, 미리 추출한 테이블과의 비교를 통해 초기 위치,  $\theta_{est}$ ,를 추정한다. 이 때, 평균적인 위치 추정 오차를 줄이기 위해 그림 3의 반복되는 그래프의 평균값을 사용하여 테이블을 작성하였다.

이 때, 얻어지는 초기 위치는  $\theta_{est}$  와  $\theta_{est} + 180^\circ\text{E}$  의 두 경우 중 하나로 나타난다. 그러므로, 극성 판별 알고리즘을 이용하여 실제 초기 위치를 추정하는 과정이 추가로 필요하다. 전동기의 실제 극성은 추정 d축에 고주파 신호를 주입하였을 때 나타나는 2고조파 성분의 부호를 이용하여 판별할 수 있다.<sup>[5]</sup>

## 3. 실험 결과

제안된 알고리즘을 검증하기 위해 사용된 전동기의 제정수는 표 1과 같다.

표 1 전동기 제정수

Rated Power	200 W
Rated Thrust	80 N
Rated Current	1.4 A <sub>rms</sub>
Pole Pitch	18mm
$\lambda_f$	0.16 V · s
$R_s + R_{inv}$	9.19 Ω
$L_{dsh} = L_{qsh}$	23.2 mH (1kHz)

그림 4-5의 실험 파형은 정지 좌표계 상에서 전압을 주입하여 전류 특성을 얻는 단계와 얻어진 정보를 이용하여 위상 차이를 계산하는 단계, 그리고 극성 판별 알고리즘을 이용하여 최종적으로 초기 자극 위치를 추정하는 단계로

나뉘어져 있다. 실험 파형에 대한 설명은 그림 4에 나타나 있다. 알고리즘을 시행한 후에는 추정된 초기 위치를 기반으로 위치 제어를 하도록 설정하였다. 그림 4의 경우  $\theta_r = 30^\circ\text{E}$  위치에서 알고리즘을 적용한 것이다. 이 경우 첫 번째 단계에서 초기 위치를 정확히 추정하였으며, 따라서 극성 판별 알고리즘을 적용한 후에도 동일한 위치를 추정하고 있음을 확인할 수 있다.

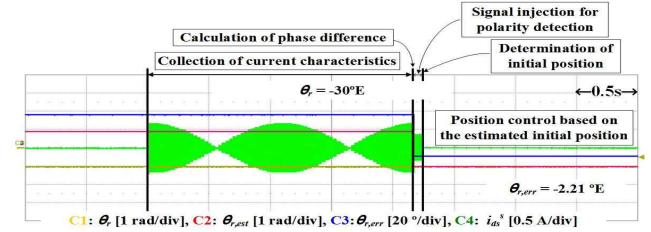


그림 4.  $\theta_r = -30^\circ\text{E}$  에서 알고리즘 적용 시

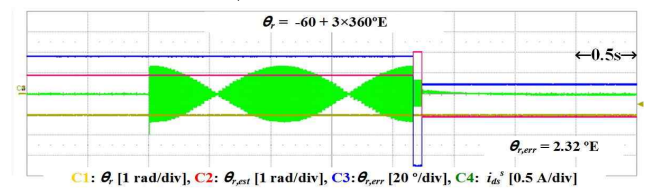


그림 5  $\theta_r = -60 + 3 \times 360^\circ\text{E}$  에서 알고리즘 적용 시

$-60^\circ\text{E}$  와  $120^\circ\text{E}$  부근은 표면 부착형 전동기와 같은 특성을 지니는 구간으로, 그림 2에서와 같이 위상을 추출하기 위한 유효 신호의 크기가 작게 나타난다. 이러한 특성을 갖는 위치에서 같은 알고리즘을 적용한 결과가 그림 5에 나타나 있다. 이 경우 신호 주입이 끝난 후 추정된 각은 실제 각과  $180^\circ\text{E}$  의 차이를 갖는다. 하지만 이후의 극성 판별 알고리즘을 통해 초기 위치를 제대로 추정하게 된다.

## 4. 결론

본 논문에서는 이동자의 움직임 없이 선형 전동기의 초기 자극 위치를 추정하기 위한 알고리즘을 제안하였다. 제안된 알고리즘은 고주파 신호를 주입하므로 이동자의 움직임을 유발하지 않는다. 따라서 선형 전동기의 이동자가 수직 방향으로 이동하는 응용 분야에서 효과적으로 사용될 수 있다. 특성을 추출하기 위한 신호 주입 및 처리 방법을 제시하였고, 제안된 알고리즘을 적용하여  $\pm 7^\circ\text{E}$  의 오차 내에서 초기 위치를 추정할 수 있음을 검증하였다.

## 참고 문헌

- [1] 윤원일, 이영호, 최종우, 김홍근, "영구자석 선형동기전동기의 초기 자극 위치 추정 알고리즘", 전력전자학회 논문지, vol.10, no.1, pp.13-20, 2005.
- [2] J. W. Choi, W. E. Yun and H. G. Kim, "Initial pole-position estimation of linear motor," *IEE Proceedings-Electric Power Applications*, vol.152, 2005.
- [3] J. K. Seok, T. S. Hwang, and D. H. Kim, "Initial Position Estimation for Closed-Loop Linear Hybrid Stepping Motor Drives Using DC Excitation," *IEEE Trans. Magnetics*, vol.42, no.8, Aug. 2006.
- [4] Y. D. Yoon, S. K. Sul, S. Morimoto, and K. Ide, "High-Bandwidth Sensorless algorithm for AC machines Based on Square-wave Type Voltage Injection," *IEEE Trans. Industry Applications*, vol.47, pp.1361-1370, Mar. 2011.
- [5] Y. Jeong, R. D. Lorenz, T. M. Jahns, and S. K. Sul, "Initial Rotor Position Estimation of an Interior Permanent-Magnet Synchronous Machine Using Carrier-Frequency Injection Methods," *IEEE Trans. Industry application*, vol.40, no.1, pp.38-45, Jan. 2005.