

리니어 펄스 모터의 위치검출을 위한 등가인덕턴스변화량 연산기법

김성현<sup>o</sup>, 이은웅\*, 이동주\*, 김일중\*\*  
 천안공업전문대<sup>o</sup>, 충남대\*, 주성대학\*\*

Calculation of Equivalent Inductance Variation  
 for Position Detection of Linear Pulse Motor

Kim, Sung-Heon<sup>o</sup>, Lee, Eun-Woong\*, Lee, Dong-Ju\*, Kim, Il-Jung\*\*  
 Chonan technical college<sup>o</sup>, Chungnam National University\*, Jusung College\*\*

**Abstract** - The position of LPM's mover can be estimated by the equivalent inductance variation with the mover's displacement. Hence, in this paper, we obtained the position detection signal by the calculation of equivalent inductance variation using the winding of linear pulse motor. And the various parameters for calculation of equivalent inductance variation were obtained by the design specification and finite element analysis of linear pulse motor. With this position signal, it is possible to calculate the driving numbers of steps, to confirm the state of step out and to determine the optimal switching angle, etc.

극의 공극 자기저항분포가 정현적이라고 가정하면, k번째 자극의 공극 자기저항  $r_k$ 은 식(1)과 같이 나타낼 수 있다.

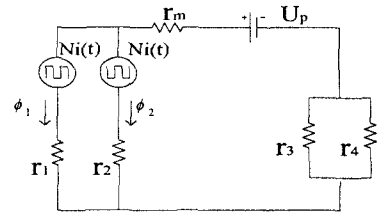


그림 1. A상 여자시의 등가회로  
 Fig. 1. Equivalent circuit when excited A-phase

1. 서 론

리니어펄스모터의 고성능제어를 위하여 속도 및 위치에 따른 상태정보가 필요하다. 상태정보를 검출하는 방법으로 외부에 자기저항소자 등의 센서를 자극에 부착하는 방법이 있지만 소형 전기기기분야에서 제어기의 경박단소화가 요구되는 현실을 고려할때 센서리스화가 요구된다.

본 연구에서 참고문헌[1]의 위치검출기법을 참조해서 외부에 센서를 취부하지 않고 LPM의 위치정보를 검출하기 위해 영구자석 기자력을 여자권선과 같은 권선수를 가진 직류기자력원으로 가정하여 영구자석에 의해 발생하는 자속의 변화를 등가인덕턴스로 정의하고 LPM 가동자의 변위에 따른 등가인덕턴스 변화량을 수식화하였다. 이는 시작기 LPM의 여자권선을 이용하여 여자전압파형 및 전류파형을 측정하여 표준화된 식에 대입하여 연산하면 가동자의 위치추정이 가능함을 보여준다.

이러한 위치검출 알고리즘을 시작기 LPM에 적용하기 위한 각종 파라미터들은 유한요소법과 속도기전력으로부터 구하고 인덕턴스변화량에 따른 위치검출신호를 얻기위한 기법을 제시하므로써 센서리스 정밀위치제어기술을 확립하고자 한다.

2. 여자권선에 의한 위치검출 알고리즘

2.1 등가 2상 4극 HB형 LPM의 자기회로 해석

2상 8극 HB형 LPM을 등가의 2상 4극 LPM으로 변환하여 바이폴라(bipolar)구동시, A상 만을 여자시킨 상태를 등가회로로 표현하면 그림 1과 같다. 그림에서  $U_p$ 는 영구자석들에 의한 기자력을,  $r_m$ 은 영구자석의 자기저항을 나타낸다.

등가 2상 4극 HB형 LPM의 가동자의 변위  $x$ 에 따라 각

$$r_k = \bar{r} + a \cos(\theta + \pi(k-1)) \quad (1)$$

여기서,  $k = 1, 2$

$\bar{r}$  = 공극 자기저항의 평균치  
 $a$  = 공극 자기저항의 진폭,  $\theta = \frac{2\pi x}{\tau}$   
 $\tau$  = 치 피치,  $x$  = 변위

자극 1과 자극 2를 통과하는 자속( $\phi_1, \phi_2$ )은 영구자석에 의한 성분( $\phi_m$ )과 여자권선에 의한 성분( $\phi_i$ )의 합성치이므로 식(2)와 (3)으로 표현된다.

$$\phi_1 = \phi_{1m} + \phi_{1i} \quad (2)$$

$$\phi_2 = \phi_{2m} + \phi_{2i} \quad (3)$$

우선, 그림 1의 등가회로에서 무여자시를 가정하고 영구자석에 의한 기자력( $U_p$ )에 의해 자극 1과 자극 2를 통과하는 자속을 구하면 식(4), (5)와 같다.

$$\phi_{1m} = \frac{r_2 \cdot U_p}{(r_1 + r_2)(A + B + r_m)} \quad (4)$$

$$\phi_{2m} = \frac{r_1 \cdot U_p}{(r_1 + r_2)(A + B + r_m)} \quad (5)$$

여기서,

$$A = \frac{r_1 r_2}{r_1 + r_2}$$

$$B = \frac{r_3 r_4}{r_3 + r_4}$$

$$A + B = \frac{2 \bar{r}^2 - a^2}{2\bar{r}}$$

다음으로 가동자에 위치한 영구자석이 존재하지 않고 단지, 권선수가  $N$ (turn)인 권선에 흐르는 여자전류  $i(t)$ 에 의한 기자력만이 존재한다고 가정하고 자극 1과 자극 2를 통과하는 자속을 구하면 식(6), (7)과 같다.

$$\phi_{11} = \frac{r_2 + 2(r_m + B)}{(r_1 + r_2)(A + B + r_m)} N \cdot i(t) \quad (6)$$

$$\phi_{21} = -\frac{r_2 + 2(r_m + B)}{(r_1 + r_2)(A + B + r_m)} N \cdot i(t) \quad (7)$$

그리고 공극 자기저항의 평균값과 영구자석의 자기저항의 비  $\zeta$ 는 식(8)과 같고 진폭값과 공극 자기저항의 평균값의 비  $\eta$ 는 식(9)와 같이 가정한다.

$$\zeta = \frac{r_m}{r} \quad (8)$$

$$\eta = \frac{r}{\alpha} \quad (9)$$

영구자석에 의한 기자력을 권선과 같은 턴수를 가진 등가 여자전류  $I_p$ 로 나타내면 식(10)과 같다.

$$U_p = N \cdot I_p \quad (10)$$

그리고 식(4) ~ (7)을 식(2), (3)에 대입하여 간략화를 위해  $\lambda$ 를 식(11)과 같이 놓으며, 영구자석과 여자전류에 의해 자극 1과 자극 2를 통과하는 자속은 식(12), (13)과 같이 나타내진다.

$$\lambda = 2\zeta + 1 - \frac{\sin^2 \theta}{\eta^2} \quad (11)$$

$$\phi_1 = \frac{r_2}{(r_1 + r_2)(A + B + r_m)} N \cdot I_p + \frac{r_2 + \lambda \cdot \bar{r}}{(r_1 + r_2)(A + B + r_m)} N \cdot i(t) \quad (12)$$

$$\phi_2 = \frac{r_1}{(r_1 + r_2)(A + B + r_m)} N \cdot I_p - \frac{r_1 + \lambda \cdot \bar{r}}{(r_1 + r_2)(A + B + r_m)} N \cdot i(t) \quad (13)$$

## 2.2 여자회로 해석

자기회로의 해석결과를 위치검출이 가능한 전기적인 양으로 나타내기 위해서는 여자회로의 해석이 필요하다. 그러므로 턴수가  $N$ 인 자극 1의 여자권선을 쇠교자속  $\psi_1$ 은 식(14)와 같이 영구자석의 등가전류  $I_p$ 와 여자전류  $i(t)$ 로 분리해서 표현할 수 있다.

$$\begin{aligned} \psi_1 &= N \cdot \phi_1 \\ &= L(x) \cdot I_p + (L + \lambda \bar{L}) i(t) \end{aligned} \quad (14)$$

여기서,  $\bar{L}$  : 인덕턴스의 평균치 [H]

식(10)에서 영구자석을 직류 기자력원으로 가정하면, 가동자의 위치에 따른 등가인덕턴스  $L(x)$ 는 식(15)와 같이

나타낼 수 있다.

$$L(x) = \bar{L} + \Delta L(x) \quad (15)$$

식(15)에서  $\Delta L(x)$ 는 등가인덕턴스의 변화분으로써 가동자의 위치에 관한 정보를 포함하고 있는 양이다. 즉,  $\Delta L(x)$ 가 최소인 위치는 가동자와 고정자의 치가 완전히 어긋난 위치( $x = r/2$ )이고 최대인 위치는 가동자와 고정자의 치가 정렬된 위치( $x = 0$ )를 의미한다. 따라서 이와 같은 인덕턴스변화량을 알 수 있다면 가동자와 고정자 치의 상대적인 위치를 검출할 수 있다.

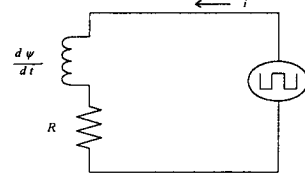


그림 2. 여자회로

Fig. 2. Excitation circuit

그리고, 등가인덕턴스의 변화량을 구동회로부터 외부에서 검출가능한 권선양단의 전압  $e$ 나 권선전류  $i(t)$ 로부터 얻기 위한 회로방정식을 유도하고, 식(15)의 쇠교자속과 구동전원과의 관계를 식(16)와 같은 전압방정식으로 나타낼 수 있으며 이 식(16)을 전기회로로 표시하면 그림 2이 된다.

$$e = R \cdot i(t) + \frac{d\psi_1}{dt} \quad (16)$$

여기서,  $e$  : 여자권선의 단자간 전압[V]

$R$  : 여자권선의 전기저항[Ω]

$\psi_1$  : 여자권선의 쇠교자속[Wb]

식(16)에 식(14)을 대입하여 등가인덕턴스 변화량  $\Delta L(x)$ 에 관하여 정리하면 식(17)과 같이 된다.

$$\Delta L(x) = \frac{\int (e - Ri(t)) dt - 2(1 + \lambda) \bar{L} i(t)}{2I_p} \quad (17)$$

따라서 구동회로의 단자전압  $e$ 와 권선에 흐르는 전류  $i(t)$ 를 측정하여 식(17)과 같은 연산을 하면 인덕턴스 변화량에 대한 신호를 얻을 수 있고 이로부터 가동자와 고정자의 상대적인 위치의 검출이 가능하다.<sup>(1)</sup>

그런데, 식(17)을 이용하여 위치검출을 위한 신호처리를 하기 위해서 상수  $R$ ,  $\bar{L}$ ,  $I_p$ ,  $\lambda$  값들을 알아야 하는데, 이 값들은 LPM의 설계 데이터와 유한요소법을 통한 해석을 통하여 얻을 수 있다.

## 3. 시작기 LPM의 위치검출

### 3.1 파라미터 $R$ , $\bar{L}$ , $I_p$ , $\lambda$ 의 산출

#### (1) $R$ , $\bar{L}$ , $I_p$ 의 결정

LPM의 설계사양으로부터 한 상 권선의 전기저항은  $R = 2.29[\Omega]$ 이었고, 인덕턴스의 평균치는  $\bar{L} = 5.8[\text{mH}]$ 이다.

그리고 2상 8극형 HB형 LPM의 경우에는 영구자석에 의한 기자력과 여자전류에 의한 기자력이 거의 같도록 설계되었으므로 영구자석의 등가여자전류  $I_p$ 는 1[A]로 취해도 큰 오차가 없다.

## (2) $\lambda$ 의 결정

본 연구에서는 먼저 유한요소법을 이용하여 공극 자기저항이 가장 작은 위치( $x=0 \rightarrow r_{\min}$ )와 가장 큰 위치( $x=\tau/2 \rightarrow r_{\max}$ )에서의 값을 구하였다. 그 결과  $r_{\min}=3.251 \times 10^5$ ,  $r_{\max} = 9.739 \times 10^5$ 이었다. 따라서  $r_{\max}$ ,  $r_{\min}$ 의 값을 가지고 공극 자기저항의 진폭  $\alpha$ 와 평균값  $\bar{r}$ 을 구하면 다음과 같다.

$$\alpha = \frac{r_{\max} - r_{\min}}{2} = 3.509 \times 10^5$$

$$\bar{r} = r_{\max} + \alpha = 6.760 \times 10^5$$

따라서 위의 값들을 식(9)에 대입하면 상수  $\eta = 1.926$ 을 얻을 수 있다.

그러나 식(8)에서 상수  $\xi$ 를 얻기 위해서는 영구자석의 자기저항을 구해야한다. 이 값을 구하는 방법으로는 영구자석에 의한 자속을 직접 측정하여 구하는 방법과 속도기전력을 이용하여 자속분포를 얻는 간접 측정법이 있다.

자속분포를 얻기 위해서는 무여자시, 가동자를 등속운전시키고 여자권선 양단에 유기되는 속도 기전력 파형을 측정하여 이 파형의 기본파 성분  $e'$ 과 주파수  $f'$ 를 가지고 식(18)을 이용하여 영구자속에 의한 자속  $\phi_m$ 을 간접적으로 구하였다.<sup>[2]</sup>

$$\phi_m = \frac{e'}{2\pi f' N} \quad (18)$$

측정한 결과, 권선양단에 유기되는 속도 기전력 파형의 기본파 성분  $e' = 10[\text{V}]$ , 주파수  $f' = 20[\text{Hz}]$ 이었다. 이 측정값으로부터 구한  $\phi_m$ 은  $6.143 \times 10^{-5} [\text{Wb}]$ 이었다.

그러므로 자기저항  $r_m$ 은  $r_m = U_p / \phi_m = 84.649 \times 10^5$ 이다. 식(8)의 관계식로부터  $\xi$ 를 구하면  $\xi = 12.522$ 을 얻는다. 또한 식(11)에서  $\sin^2 \theta$ 를 0.5로 취하여도  $\lambda$ 에는 단지 0.1%의 오차밖에 영향을 못미치므로  $\sin^2 \theta = 0.5$ 로 정하고 식(8), (9)로부터 구한 값들과 함께 식(11)에 대입하면  $\lambda = 25.909$ 가 된다.

## 3.2 $\mathcal{L}(x)$ 에 의한 위치검출

3.1절에서 구한 파라미터들을 식(17)에 대입하고 측정으로 얻은 그림 3의 전압, 전류파형을 가지고 위치검출 알고리즘에 의해서 연산을 하여 인덕턴스변화량  $\mathcal{L}(x)$ 를 구하므로써 위치검출신호를 추정할 수 있다.

그림 4의 위치신호에서 최대가 되는 부분이 가동자와 고정자 치가 일치된 위치( $x=0$ )이고 최소가 되는 부분은 어

긋난 위치( $x = \tau/2$ )이다.

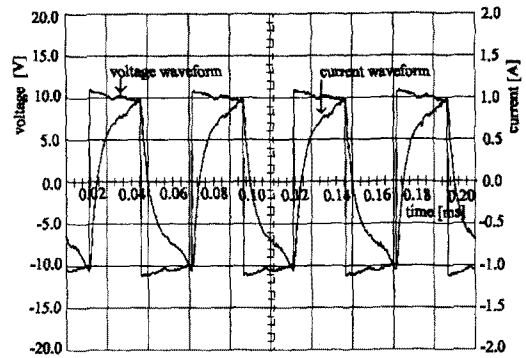


그림 3. 측정결과  
Fig. 3. Result of measurement

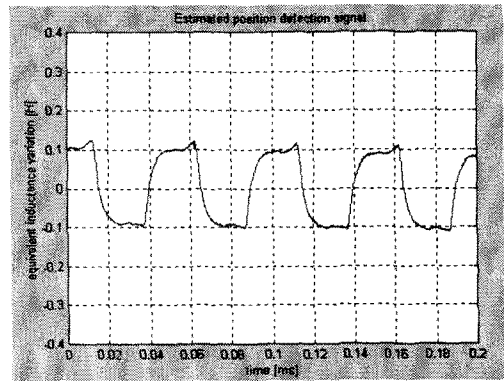


그림 4. 추정된 위치검출신호  
Fig. 4. Estimated position detection signal

## 4. 결론

본 연구에서 위치검출을 위한 등가인덕턴스변화량을 정식화하고 이를 시작기 LPM에 적용하기 위하여 파라미터  $R$ ,  $\bar{L}$ ,  $I_p$ ,  $\lambda$ 를 구하는 기법을 제시하였다. 그리고 시작기 LPM의 여자권선에서 구한 여자전압과 전류를 측정하여 등가인덕턴스변화량의 연산을 통하여 가동자와 고정자 치의 상대적인 위치를 추정하였다.

### [참고 문헌]

- [1] Masami Nirei and Yukio Yamamoto, "Discussion on Method for Position Detection Using Exciting Winding on Linear Pulse Motor", 日本電氣學會 研究會 資料, LD-92-12, 1992
- [2] Tsutomu Yokozuka, Eiji Baba, and Shinichi Saito, "A Consideration on Speed Electromotive Force Constants of the LPM", T.IEE JAPAN, Vol.107-D, No.5, 1987