

## LPM의 동추력특성측정 및 선형화 제어기법 개발

김 문 환, 이 남 기, 김 국 현  
(한국전기연구소 발전제어사업팀)

### A Development of dynamic characteristics measuring system and linearization control method for Linear Pulse Motor

Moonhwan Kim, Namki Lee, Kookhun Kim  
(Korea Electrotechnology Research Institute)

**Abstract** - We had developed a prototype Linear Pulse Motor(LPM) for the linear motion actuator. In this paper, it is mentioned a new dynamic equations which is considered the nonlinearity of the thrust force of LPM. And a measuring method of ripples in the thrust forces is proposed and the ripples were measured in the laboratory. In the experimental results, it is shown the validity of the proposed measuring method for catching of the ripple values and waveforms in the thrust force.

#### 1. 개 요

선형펄스모터(Linear pulse motor; LPM)는 어떤 운동 변환기구를 빌리지 않고 모터 자신만으로 직접 직선운동을 할 수 있는 모터이다. 이 모터의 특징으로는, 종래의 회전형 전동기기에 비하여 단위 체적당 낼 수 있는 추력대 질량비가 매우 크며, 한 세트의 LPM 시스템으로 구현 혹은 담당할 수 있는 구동속도 범위가 대단히 넓은 것 등을 들 수 있다. 이러한 특징점을 갖는 선형 펄스모터이나 모터의 추력에는 치구조, 역기전력등에서의 심한 비선형성을 내포하고 있어, 특히 저속구동 응용분야 혹은 고정밀 위치제어를 필요로 하는 자동화분야에의 LPM적용이 늦어지고 있다. 본 연구는 이러한 LPM의 추력리플에 착목하여 이의 저감기법을 설계하고자 한다. 비선형적인 특징을 갖는 추력에 선형화 기법을 적용하여, 선형적인 추력제어 특성을 갖는 LPM을 개발하고자 하는 것이다. 구체적으로, 우선, 대상 LPM으로 영구자석을 갖는 2상 하이브리드형 LPM을 선정하였다. LPM의 추력특성에 비선형적인 영향을 주는 각 성분을 충분히 고려한 비선형 동적 모델을 제안 하였다. 이 기법에 대하여 간단히 소개한다. 또한 본연구실에서 개발한 동추력에 포함되는 추력리플 성분의 측정기법과 그 측정실험 결과에 관하여 소개한다.

#### 2. 선형화 기법개발을 위한 동모델방정식의 개발

본 연구에서는 LPM의 추력리플 감소 제어방식의 개발을 연구목적으로 하고 있다. 연구대상 LPM으로는 2상 hybrid-type LPM을 사용하였다. 이는 variable reluctance(VR)성분 만이 아니라, 영구자석에 의한 추력도 함께 사용되는 것으로 추력의 비선형성이 매우 큰 모터라고 할 수 있다. 먼저, 일반적으로 2상 hybrid-type LPM의 추력제어에 사용되는 일반적인 추력방정식을 식(1)에 나타낸다.

$$T_e(i_1, i_2, x) = N_r K_T \{ -\sin(x)i_1 + \cos(x)i_2 \} \quad (1)$$

여기서,  $T_e$  는 발생하는 총추력,  $i_1, i_2$  는 1, 2상의 상전류,  $x$  는 가동자의 변위,  $N_r$  은 가동자의 치수(tooth numbers),  $K_T$  는 영구자석에 의해 결정되는 상수이다.

식(1)에서  $i_1, i_2$ 를 다음 (2),(3)식의 값으로 두면,

$$i_1 = -\frac{\tau}{N_r K_T} \sin(x) \quad (2)$$

$$i_2 = +\frac{\tau}{N_r K_T} \cos(x) \quad (3)$$

추력을 선형적으로 제어할 수 있음을 간단히 알 수 있다. 위식에서  $\tau$  는 추력명령이다. 그러나, 식(1)에 의한 추력의 정의는 통상, 인덕턴스에 의한 VR의 힘성분을 무시하며, 또한 영구자석에 의한 자속분포가 정현파라고 가정함에 의하여 성립된다. 그러나 실제 추력에는 상당한 리플이 포함되어 있다. 즉, VR성분에 의한 추력 리플의 값이 무시할 수 있을 정도로 적지 않으며, 영구자석에 의한 자속분포의 형태가 정현파가 아님을 알 수 있다. 이에 LPM의 선형화제어를 위해서는 영구자석과 VR성분을 고려한 엄밀한 의미의 비선형 동적모델이 필요하게 된다. 먼저 하이브리드 LPM의 쇄교자속함수를 영구자석과 가동자전류에 의한 쇄교자속성분으로 나

눈다. 이를 다음 식(4)에 나타낸다.

$$\lambda(i, x) = \lambda_m(x) + \lambda_r(i, x) \quad (4)$$

여기서,  $i$ 는 상전류,  $x$ 는 가동자의 위치를,  $\lambda(i, x)$ 는 총쇄교자속수,  $\lambda_m$ 은 영구자석에 의한 쇄교자속수,  $\lambda_r$ 은 가동자전류에 의한 쇄교자속수를 나타낸다.

또한  $\lambda_r$ 에는 가동자전류에 비례하는 성분과 가동자의 전류크기, 가동자의 위치에 의존하는 성분이 존재한다. 즉, 식 (5)와 같이 나타낼 수 있다.

$$\lambda_r(i, x) = L(i, x)i = [L_0 + \tilde{L}_e(x) + \tilde{L}_o(x)\text{sgn}(i)]i \quad (5)$$

여기서,  $L_0$ 는 상인덕턴스 중 위치에 무관한 부분,  $\tilde{L}_e$ 는 상인덕턴스중 위치에 따라 변하는 부분,  $\tilde{L}_o$ 는 상인덕턴스중 위치와 가동자 전류의 부호에 따라 변하는 부분을 나타낸다.

또한 역기전력  $E$ 는 다음 식으로 나타내어진다

$$E(i, x, \dot{x}) = \dot{x} D_x \lambda(i, x) = \dot{x} \{g(x) + \tilde{L}_e'(x) i + \tilde{L}_o'(x) |i|\} \quad (6)$$

여기서  $D$ 는 미분연산자,  $g(x)$ 는 영구자석에 의한 자석분포함수이다.

식(6)의  $g(x)$ 는 다음과 같이 정의된다.

$$g(x) = D\lambda_m(x) \quad (7)$$

2상 hybrid-type LPM에서 발생하는 총추력은 1, 2상에서 발생하는 추력의 합으로 다음 (8)식으로 표현된다.

$$T_c(i_1, i_2, x) = T(i_1, x) + T(i_2, x - \frac{\pi}{2}) \quad (8)$$

여기서, 한상의 추력 함수  $T$ 를 다음과 같이 나타낼 수 있다.  $\tilde{L}'$ 는  $\tilde{L}$ 의  $x$ 에 대한 일차미분을 나타낸다.

$$T(i, x) = N_c \int_0^i D_x \lambda(\eta, x) d\eta = N_c \left\{ g(x) + \frac{1}{2} \tilde{L}_e'(x) i + \frac{1}{2} \tilde{L}_o'(x) |i| \right\} i \quad (9)$$

여기서  $N_c$ 은 가동자齒수이다.  $N_c g(x) i$ 는 PM추력 성분,  $\frac{1}{2} N_c \tilde{L}_e'(x) i^2 + \frac{1}{2} N_c \tilde{L}_o'(x) |i| i$ 는 VR 추력성분에 해당된다.

지금까지의 모델링 결과를 종합하여 정리하면 2상 하이브리드 스텝 모터의 동적 모델은 다음과 같다.

$$L(i_1, N_c x_m) \frac{di_1}{dt} = -R_s i_1 - E(i_1, N_c x_m, N_c \dot{x}_m) + v_1 \quad (10)$$

$$L(i_2, N_c x_m - \frac{\pi}{2}) \frac{di_2}{dt} = -R_s i_2 - E(i_2, N_c x_m - \frac{\pi}{2}, N_c \dot{x}_m) + v_2 \quad (11)$$

$$J \dot{x}_m + B \dot{x}_m + T_L = T_c(i_1, i_2, N_c x_m) \quad (12)$$

여기서,  $R_s$ 는 상저항,  $L$ 은 상인덕턴스이다.

$v_1, v_2$ 는 각상의 인가전압,  $J, B, T_L$ 는 각각 관성모멘트, 점성마찰계수, 부하추력을 나타낸다.

(10)~(12)식은 영구자석과 가동자의 위치변화에 따른 VR성분을 고려하여 표현한 식이다. 본연구에서는 유도해낸 동모델 방정식으로 비선형적인 요소를 보상한 추력제어기 설계에 임하고자한다.

### 3. 추력 리플 측정

LPM 기본 특성 평가 시스템으로 양방향성 동추력 측정 시스템을 설계, 동추력에 나타나는 추력리플치를 직접 측정하였다. 제작한 측정장치를 그림 1에 나타낸다.

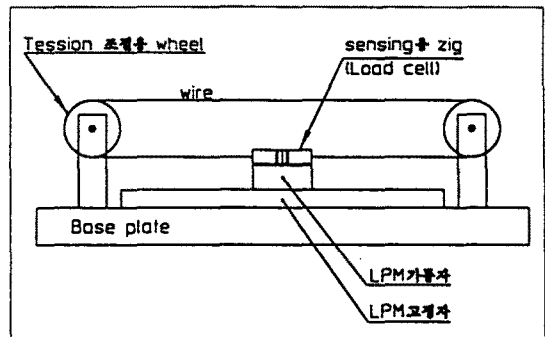


그림 1 추력리플 측정장치의 개념도

추력리플 측정용 sensor에는 load cell을 사용하였다. 이는 리플치를 직접 물리적인 값으로 측정할 수 있으며, 힘측정에 주로 사용되는 가속도센서에 비교하여 매우 저렴하며, 취급이 용이하다는 등의 장점이 있기 때문이다. 실험에 사용한 load cell은 스트레인게이지형으로, 추력발생에의 영향을 줄이기 위하여 최대한 경량을 선택하였다. 그림에서 Base plate는 지면에 고정되어 있으며, LPM의 고정자가 이 Base plate에 고정되어 있다. load cell은 LPM의 가동자위에 sensing용 zig를 사용하여 고정하였다. 가동자는 전진, 후진(그림에서 좌우 양방향으로) 할 수 있다. 또한 추력리플도 양방향성의 값(가동자의 진행방향에 대하여 '+'와 '-')을 가지므로 이의 측정을 위하여 wheel과 wire를 사용하여 어느정도의 일정한 장력 값이 load cell의 전후 양

쪽으로 걸려 있도록 하였다. 가동자가 움직이게 되면 양쪽으로 장력이 걸려 있는 load cell은 가동자와 함께 움직이게 된다, 이때 발생하는 추력의 리플 성분은 wire와 wheel등의 마찰저항에 의하여 load cell에 직접 나타나게된다. 즉, LPM의 추력에 발생하는 양방향성 리플성분만이 직접 측정될 수 있게 된다. 'wire - wheel - load cell'의 alignment는 load cell의 측정치에 매우 민감한 영향을 주므로 광alignment법을 사용하여 일직선상으로 정렬시켰다. 측정은 시작품LPM(pitch 2mm)에 대하여 행하였다. 구동속도는 2PPM, 구동전류치는 0.8Amp., 동추력의 평균치는 5Kg·f 이다. 다음 그림 2에 추력리플측정결과를 나타낸다. (a)는 load cell에 의한 추력리플의 측정결과이며, (b)는 가속도계에 의한 측정결과를 나타낸다. 이 측정결과에서  $\pm 0.5\text{Kg}\cdot\text{f}$ 의 추력리플의 피크치값을 알 수 있으며 또한 그림 (a), (b)에서 확인 되듯이 추력 리플의 과형측정도 가능하다. 이는 곧, 리플치의 정량적 값 뿐만아니라 시간대역과 주파수대역까지 파악할 수 있음을 보인다.

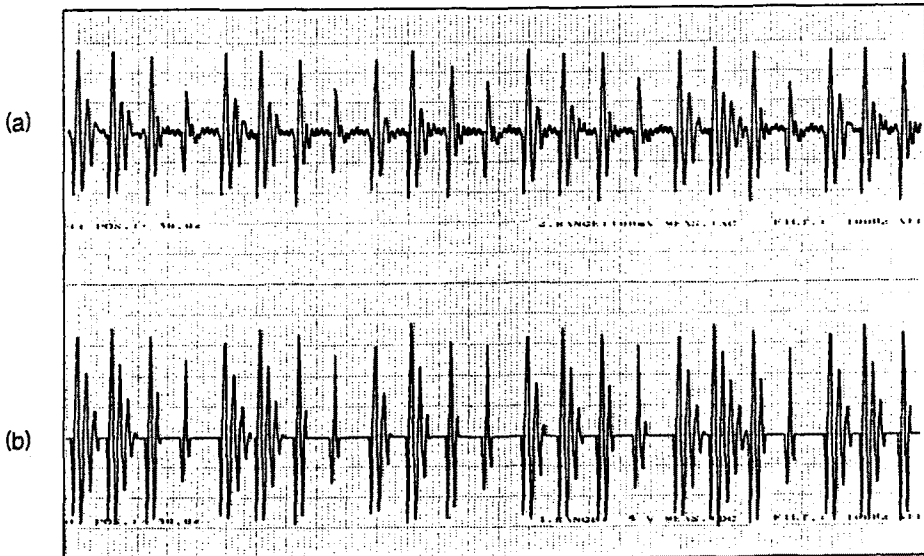
#### 4. 결 론

- (1) 영구자석 및 역기전력의 변화등 비선형적인요소를 고려한 동추력 운동방정식을 유도하였다.

- (2) 양방향성 동추력 측정기법을 개발, 시제품LPM의 추력리플 측정을 행하였다. 측정결과 인장과 압박, 양방향의 추력리플 측정이 가능함을 확인 했다.

#### {참 고 문 헌}

- [1] 김문환외, "LPM의 추력리플 저감 기법 개발", 대한전기학회, 하계학술논문집(A), pp.385-360, 1996.7  
 [2] 김문환외, "LPM을 이용한 x-y table과 사용자 interface의 개발", 대한전기학회, 하계학술논문집(A), pp.291-293, 1995.7  
 [3] 김문환외, "FA용 Linear Pulse Motor 설계 및 Microstep 구동", 대한전기학회, 하계학술논문집(A), pp.322-324, 1994.7.  
 [4] S. H. Chu and I. J. Ha, "Control of hybrid step motor via a simplified linearization technique", Internation Journal of Control, vol 61, No. 5, pp. 1143-1167, 1995  
 [5] D. G. Manzer, et al., "Variable reluctance motor characterization" IEEE Trans. Ind. Elec., Vol.36, No.1, pp56-63, 1989



시간 (0.1 sec/div)

- (a) load cell에 의한 추력리플 측정결과 (0.167Kg·f/div)  
 (b) 가속도계에 의한 추력리플 측정결과 (0.5G/div)

그림 2 추력리플 측정결과(장력 2Kg·f 인가)