

## 선형압축기 구동용 LPMSM의 위치 계산 방법

안정렬\*, 전태원\*, 이흥희\*, 김홍근\*\*, 노의철\*\*\*  
울산대학교 전기전자정보시스템공학부\*, 경북대학교 전자전기공학부\*\*,  
부경대학교 전기제어공학부\*\*\*

### Method for Calculating the Position of the LPMSM for Driving Linear Compressor

J.R. Ahn\*, T.W. Chun\*, H.H. Lee\*, H.G. Kim\*\*, E.C. Nho\*\*\*

Dept. of Electrical Eng., Univ. of Ulsan\*, Dept. of Electrical Eng., Univ. of Kyungpook\*\*, Dept. of Electrical Eng., Univ. of Pukyong\*\*\*

#### ABSTRACT

The stroke of piston in the linear compressor driven by LPMSM can be obtained from integrating the input voltage and current of LPMSM, and may be diverged due to dc components in the voltage and current. The strategy to prevent the divergence of stroke using both the high-pass filter and dc offset compensation was suggested. The equations for the magnitude and phase of the stroke and also dc offset including the stroke are derived as a function of the cut-off frequency of HPF. The performance of stroke calculation scheme has been verified by experimentally on a linear compressor drive system, where the control was implemented by a 16-bit DSP

#### 1. 서론

현재 가정용 냉장고나 에어컨에서는 거의 대부분 왕복동식 압축기 (Reciprocating compressor)를 사용하고 있다. 이 왕복동식 압축기는 회전운동을 크랭크축 메커니즘에 의해 피스톤의 왕복운동으로 바꿔주기 때문에 크랭크축등에서 기계적인 마찰 등에 의한 기계적인 손실 때문에 압축기의 효율이 떨어지는 문제점이 있다. 이 압축기의 효율을 증가시키기 위하여 최근에 선형 압축기 (Linear compressor) 가 개발되기 시작하였다<sup>[1,2]</sup>.

이 선형압축기는 프리 피스톤 구조로 되어있어서 운동 변화에 따른 베어링 부 및 슬라이딩부에 나타나는 마찰 저항을 대폭 줄일 수 있으므로 소비전력 저감에 큰 효과가 있다. 이 피스톤의 스트로크(stroke)를 정밀하게 제어하기 위하여 정확한 피스톤의 위치 즉 스트로크를 검

출하기 위하여, 일반적으로 센서리스 방식을 사용한다. 이 센서리스 방식에서 전압 및 전류값으로 스트로크를 계산하는 과정에서 적분기를 사용하여야 한다. 그런데 입력 교류 전압 및 전류에 직류성분이 포함되어 있으면, 이 직류성분이 축적되어 스트로크 값이 발산하게 된다.

이 적분문제를 해결하기 위하여 여러 논문이 발표되었다. 시스템 동작 전에 전동기의 입력 전압 및 전류에 포함된 직류성분을 측정 후, 이 직류 값을 보상하는 방법이 있으나 이 직류값이 동작 중에도 바뀌므로 정확한 직류값을 측정하기 힘들다<sup>[3]</sup>. 전압 및 전류 모델을 사용하는 방식은 속도 제어하는 회전기기에서는 적용할 수 있으나 선형적으로 왕복 동작하는 선형전동기에서는 응용하기 힘들며, 계산 량이 너무 많다는 단점도 있다<sup>[4]</sup>.

따라서 본 연구에서는 고역필터 및 직류 오프셋 보상 방식을 사용하여 선형전동기의 입력 전압 및 전류의 직류성분에 의한 스트로크의 발산을 방지하는 기법을 제시하였다. 16비트 DSP를 사용한 실험결과로 본 논문에 제시한 적분방식의 타당성을 확인한다.<sup>[1]</sup>

#### 2. LPMSM 스트로크 보상기법

그림 3은 LPMSM의 등가회로이다. 이 전동기의 고정자 권선 저항과 권선의 인덕턴스와 함께 역기 전력이 직렬로 구성되며, 역기전력은 가속도에 비례한다. 위의 등가회로를 사용하여 LPMSM의 고정자 전압방정식은 다음과 같이 표현할 수 있다.<sup>[5]</sup>

$$V_m = a \frac{dX}{dt} + R_m i_m + L_m \frac{di_m}{dt} \quad (1)$$

여기서

$V_m, i_m$  : 전동기 입력전압 및 전류

$R_m, L_m$  : 전동기 고정자 저항 및 인덕턴스

$X$  : 피스톤 행정거리 (Stroke)

$a$  : 모터상수

$E = \alpha \frac{dX}{dt}$  : 전동기의 역기전력 이다.

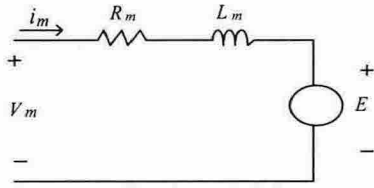


그림 3. LPMPSM의 등가회로  
Fig.3 Equivalent circuit of LPMPSM

식 (1)에서 스트로크 X는 다음 식과 같이 유도된다.

$$\begin{aligned} X &= \frac{1}{\alpha} \int (V_m - R_m i_m - L_m \frac{di_m}{dt}) dt \\ &= \frac{1}{\alpha} \int E dt \end{aligned} \quad (2)$$

위의 식에서 보면 역기전력 분을 적분하여 스트로크를 계산하는데 만약 이 적분을 위하여 순수적분기 (Pure integrator)를 사용할 경우, 고정자 전류 및 전압에 포함된 직류 성분이 계속 누적되어 발산하게 된다는 큰 문제점이 있다.

따라서 본 논문에서는 역기전력에 포함된 직류성분을 제거하여 스트로크의 발산을 방지하기 위하여 고역필터 (High-pass filter)를 사용한다. 고역필터의 효과를 분석하기 위하여 먼저 역기전력 E에 직류성분  $E_{dc}$ 가 포함되었을 경우 스트로크는 식 (3)과 같이 표현된다.

$$\begin{aligned} X_m(t) &= \frac{1}{\alpha} \int_0^t (E_m \cos \omega t + E_{dc}) dt \\ &= \frac{E_m}{\alpha \omega} \sin \omega t + \frac{E_{dc}}{\alpha} t \end{aligned} \quad (3)$$

다음은 고역필터의 식을 표시하면 다음과 같다.

$$X_h(S) = \frac{\tau S}{\tau S + 1} X_m(S) \quad (4)$$

(여기서  $\tau = \frac{1}{2\pi f_c}$ ,  $f_c$  = 고역필터의 차단주파수)

식(3)의 스트로크 식을 식(4)에 대입하고, 고역필터 출력을 교류성분  $X_{ss}$ 과 직류성분  $X_{dc}$ 을 분리한다.

$$\begin{aligned} X_h(S) &= \frac{\tau S}{\tau S + 1} \left( \frac{E_m}{\alpha \omega} \sin \omega t + \frac{E_{dc}}{\alpha} t \right) \\ &= X_{ss}(S) + X_{dc}(S) \end{aligned} \quad (5)$$

각 성분을 분리하여 고역필터의 출력 스트로크 식을 유도한다. 먼저 스트로크의 성분 중 먼저 교류성분은

정현파의 정상상태이므로 다음 식과 같이 표현된다.

$$X_{ss} = \frac{1}{\sqrt{1 + (\frac{f_c}{f})^2}} \frac{E_m}{\alpha \omega} \sin [\omega t + \tan^{-1}(\frac{f_c}{f})] \quad (6)$$

여기서 인버터 주파수보다 고역필터의 차단주파수가 상당히 작게 설정할 경우, 차단주파수를 무시하여 근사화시키면 다음 식과 같다.

$$X_{ss} \cong \frac{E_m}{\alpha \omega} \sin \omega t = X_p \sin \omega t \quad (7)$$

다음은 고역필터의 출력 스트로크 성분 중 직류성분은 정상상태에서는 S=0이 되므로 다음 식과 같다.

$$X_{dc} = \frac{\tau}{\alpha} E_{dc} = \frac{1}{2\pi f_c \alpha} E_{dc} \quad (8)$$

식(7)과 식(8)를 사용하여 스트로크 식은 다음과 같다.

$$X_h = X_{ss} + X_{dc} = \frac{E_m}{\alpha \omega} \sin \omega t + \frac{E_{dc}}{2\pi f_c \alpha} \quad (9)$$

식(9)에서 보면 고역필터를 통과하더라도 직류성분이 포함되어 있으며, 이 직류 값은 고역필터의 차단주파수에 반비례한다. 고역필터의 출력 스트로크 값에 포함된 직류성분 값을 측정하여, 식(9)에 있는 직류성분을 빼면 거의 정확한 스트로크 값을 구할 수 있다.

## 4. 시스템구성 및 실험결과

### 4.1 시스템 구성

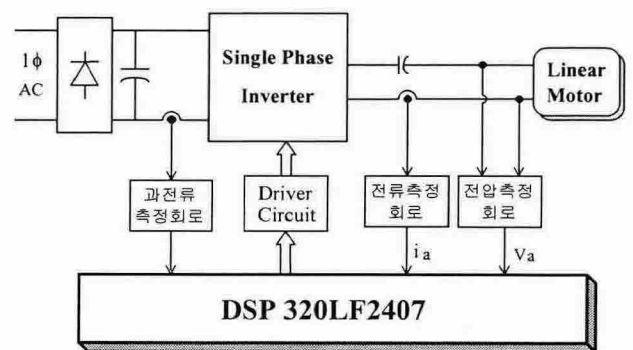


그림 4 시스템 구성  
Fig. 4 System configuration

그림 4는 선형압축기에서 스트로크 제어를 위한 시스템 구성도이다. 선형 압축기의 피스톤의 스트

로크제어를 위한 반도체 전력변환기로 단상 PWM 인버터를 사용하며, LPMSM내의 인덕턴스에 의한 유도성 부하를 보상하기 위하여 인버터와 선형전동기 사이에 커패시터를 설치하였다. 스트로크제어를 위하여 16비트 DSP TMS320LF2407를 사용하였다.

#### 4.2 실험결과

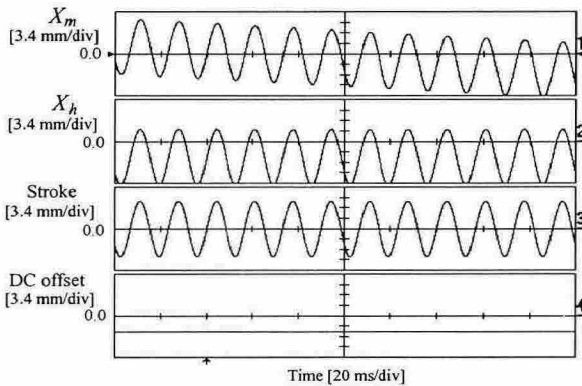


그림 5 스트로크 보상에 대한 실험결과  
Fig. 5 Experimental results for stroke compensation

그림 5은 인버터의 주파수가 60[Hz], 차단주파수가 1[Hz]인 고역필터를 사용하고 스트로크의 피크값을 8[mm]일 경우 입력전압 및 전류에 포함된 직류성분 때문에 스트로크 계산 시 발산되는 것을 방지하는 기법에 대한 실험을 수행한 결과이다. 첫 번째 파형은 LPMSM 입력전압 및 전류값으로 역기전력을 계산하고 이 역기전력을 적분한 스트로크 파형이며, 입력신호의 직류성분 때문에 발산됨을 알 수 있다. 두 번째는 고역필터 출력 파형이며, 정현파의 스트로크 값에 음의 값을 가지는 직류성분이 포함되어 있음을 알 수 있다. 고역필터 네 번째는 고역필터의 출력파형에서 약 -5.2[mm]의 직류성분  $X_{dc}$  만을 추출한 파형이다. 세 번째 파형은 고역필터 출력 스트로크에 직류성분  $X_{dc}$  값을 뺀 스트로크 파형으로 직류성분이 없는 거의 정현파임을 알 수 있다.

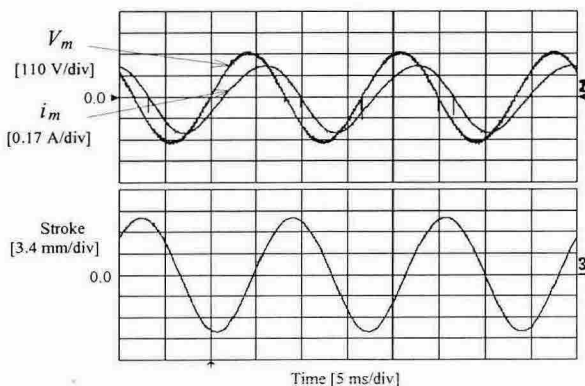


그림 6 전압, 전류 및 스트로크 파형  
Fig. 6 Waveform of voltage, current and stroke

그림 6은 정상상태에서 저역필터로 필터링한 LPMSM의 입력전압 및 전류와 본 논문에서 제시한 기법으로 계산된 스트로크의 파형을 보인 것이다.

#### 5. 결론

본 연구에서는 고역필터 및 직류 옵셋 보상 방식을 사용하여 시간지연을 최소화 하면서 입력신호의 직류성분에 의한 LPMSM에 의해 구동되는 선형압축기의 스트로크의 발산을 방지하는 기법을 제시하였다. 인버터 주파수에 대한 고역필터의 차단주파수가 감소될 경우에는 고역필터에서 출력된 스트로크의 값 및 위상의 변화가 감소되었으나, 스트로크에 포함된 직류 값은 증가됨을 알 수 있었다. 16비트 DSP를 사용한 실험결과 고역필터의 출력 스트로크 값에 직류성분을 계산 보상함으로써 정상상태뿐만 아니라 과도상태에서도 직류성분이 없는 스트로크를 얻을 수 있어서 본 논문에서 제시한 기법이 타당함을 확인하였다.

본 연구는 산업자원부 지원에 의하여 기초전력연구원(과제번호:R2005-B-109)주관으로 수행된 과제임.

#### 참고 문헌

- [1] R.Z.Unger, "Linear Compressors For Clean and Specialty Class", International Compressor Engineering Conference, 1998, pp.73-78.
- [2] Van der Walt, N.R., and Unger, R., "The Simulation and Design of a High Efficiency, Lubricant Free, Linear Compressor for a Domestic Refrigerator", Proceeding of the International Compressor Engineering Conference, 1992, pp.1-9.
- [3] Xingyi Xu and D.W.Novotny, "Implementation of direct Stator Flux Orientation Control on a Versatile DSP Based System", IEEE Trans. On Ind.Appl., Vol.27, No.4, July/Aug., 1991, pp.694-700.
- [4] H.Can, E.Akin, and H.B.Eratan, "A new integration algorithm for flux estimation using the voltage model", International Journal for Computation & Mathematics in Electrical & Electronic Engineering, Vol.21 No.2, 2002, pp.252-264.
- [5] M.Sanada, S.Morimoto, and Y.Takeda, "Analysis for Sensorless Linear Compressor using Linear Pulse Motor", in Conf. Rec. of IAS, 1999, pp.2298-2304.