

리니어 컴프레서를 위한 파라미터 추정 및 제어

Parameter Identification and Control for Linear Compressors

김규식 *

Gyu-Sik Kim

Abstract - A closed-loop sensorless stroke control system for a linear compressor has been designed. The motor parameters are identified as a function of the piston position and the motor current. They are stored in ROM table and used later for the accurate estimation of piston position. Also it was attempted to approximate the identified motor parameters to the 2nd-order surface functions. Some experimental results are given in order to show the feasibility of the proposed control schemes for linear compressors.

Key Words : sensorless control, linear compressor, motor parameters, piston position

1. 서 론

기존의 왕복동식 컴프레서에서는 회전하는 로터리 모터의 운동을 크랭크 축에 의해 직선으로 바꾸어 주는 반면, 리니어 컴프레서는 피스톤이 리니어모터에 의해 직접 구동되는 피스톤 타입 컴프레서이다. 리니어 컴프레서에서는 모든 구동 힘이 직선운동방향으로 가해지기 때문에 피스톤에 의해 측면방향의 미는 힘이 발생하지 않는다. 이에 따라, 기존의 왕복동식 컴프레서에 비해 마찰손실이 작고 운전 중에 소음이 작다.[1]

회전운동을 직선운동으로 바꿀 필요가 없으며 마찰손실이 작고 리니어 컴프레서는 기존의 왕복동식에 비해 에너지 효율이 현격히 향상되어 레저용 소형 냉장고에서부터 가정용 냉장고, 그리고 에어컨에 이르기까지 그 응용범위를 넓혀 가고 있다. 본 논문에서는 리니어 컴프레서를 위한 페루우프 센서리스 스트로크 제어시스템이 구성되었다. 피스톤 위치를 정확히 알아내기 위해 모터 매개변수를 피스톤 위치와 모터 전류의 함수로 추정하였다. 이 매개변수 데이터는 ROM 테이블에 저장한 뒤 차 후 피스톤 위치를 정확히 알아내는데 사용된다. 또한, 추정된 전동기 매개변수의 데이터 크기를 줄이기 위해 2차원 곡면 함수로 근사화하는 작업을 수행하였다. 실험을 통해 본 제어 방식이 리니어 컴프레서에 유용하게 사용될 수 있음을 보였다.

2. 센서리스 스트로크 제어

리니어 컴프레서 내에 있는 리니어 모터는 회로 방정식

은 다음의 식 (1)처럼 선형 미분방정식으로 나타낼 수 있다. 리니어 모터의 추력 F_e 도 식 (2)처럼 선형식으로 표시할 수 있다.

$$\alpha \frac{dx(t)}{dt} + L_e \frac{di(t)}{dt} + R_e i(t) = v(t) \quad (1)$$

$$F_e(t) = \alpha i(t) \quad (2)$$

식 (1) 과 (2) 에서 α 는 리니어 모터의 추력과 전류사이의 관계를 나타내는 상수로서 자속밀도 B_e 와 유효권선길이 l_e 의 곱과 같다. L_e 는 유효인덕턴스, R_e 는 유효저항, $v(t)$ 는 전원전압을, $i(t)$ 는 권선에 흐르는 전류를, 그리고 $\alpha \frac{dx(t)}{dt}$ 는 리니어 모터의 운동에 의해 권선에 발생하는 역기전력을 의미한다. 식 (1)을 $x(t)$ 에 관해 정리하면 다음과 같다.

$$\frac{dx(t)}{dt} = \frac{1}{\alpha} \left(v(t) - L_e \frac{di(t)}{dt} - R_e i(t) \right) \quad (3)$$

식 (3)을 적분한 피스톤 위치의 추정값 $\hat{x}(t)$ 는 다음과 같다.

$$\hat{x}(t) = \int_0^t \left(\frac{dx}{d\tau} \right) d\tau$$

$$= \frac{1}{\alpha} \int_0^t [v(\tau) - R_e i(\tau)] d\tau - \frac{L_e}{\alpha} i(t) \quad (4)$$

식 (4)에서 모터 매개변수는 일정한 상수가 아니기 때문에 일정한 상수라고 가정하고 식 (4)에서 피스톤의 위치를 추정

저자 소개

* 김규식: 서울시립대학교 전자전기컴퓨터공학부 교수

한다면 추정오차가 커져 시스템의 피스톤 위치 제어성능에 영향을 적지 않게 미친다. 따라서, 가장 영향을 미치는 α 와 L_e 를 피스톤 위치 $x(t)$ 와 모터 전류 $i(t)$ 에 따른 함수로 추정하여 데이터베이스화 함으로써 피스톤의 위치추정오차를 줄이고자 한다. 식 (3)으로부터 식 (5)를 얻을 수 있다.

$$\hat{\alpha} x(t) + \hat{L}_e i(t) = \int_0^t [v(\tau) - R_e i(\tau)] d\tau \quad (5)$$

식 (5)에 있는 $x(t)$, $i(t)$, $v(t)$ 는 각각 LVDT 와 같은 위치센서, 전류센서, 전압센서를 이용하여 직접 측정된 값이다. $\hat{\alpha}$ 와 \hat{L}_e 는 각각 α 와 L_e 의 추정 값이다. 리니어 컴프레서를 최초로 개발한 후 리니어 모터의 매개변수를 식 (5)로 추정하기 위해서는 위치, 전류, 전압 등은 직접 측정해야 한다. 한편, 피스톤이 좌우로 직선운동을 할 때 정상상태에서 한 주기를 t_n 이라 하고 이를 n 등분하여 각각의 시간을 $0, t_1, t_2, \dots, t_{n-1}, t_n$ 이라 하자. 그러면 다음과 같은 n 개의 방정식을 얻을 수 있다.

$$\begin{aligned} \hat{\alpha} x(t_1) + \hat{L}_e i(t_1) &= \int_0^{t_1} [v(\tau) - R_e i(\tau)] d\tau \\ \hat{\alpha} x(t_2) + \hat{L}_e i(t_2) &= \int_0^{t_2} [v(\tau) - R_e i(\tau)] d\tau \\ &\vdots \\ \hat{\alpha} x(t_n) + \hat{L}_e i(t_n) &= \int_0^{t_n} [v(\tau) - R_e i(\tau)] d\tau \end{aligned} \quad (6)$$

식 (6)을 정리하면 식 (7)과 같이 나타낼 수 있다.

$$A \begin{bmatrix} \hat{\alpha} \\ \hat{L}_e \end{bmatrix} = b \quad (7)$$

여기서, $n \times 2$ 매트릭스 A 와 $n \times 1$ 벡터 b 는 다음과 같이 주어진다.

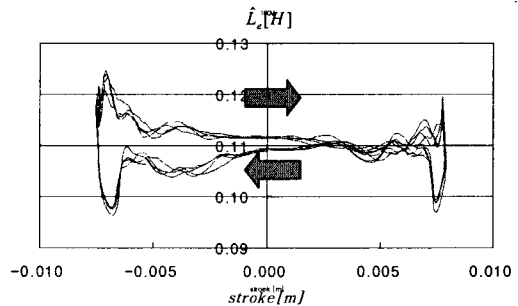
$$\begin{aligned} A &= \begin{bmatrix} x(t_1) & i(t_1) \\ x(t_2) & i(t_2) \\ \vdots & \vdots \\ x(t_n) & i(t_n) \end{bmatrix}, \\ b &= \begin{bmatrix} \int_0^{t_1} [v(\tau) - R_e i(\tau)] d\tau \\ \int_0^{t_2} [v(\tau) - R_e i(\tau)] d\tau \\ \vdots \\ \int_0^{t_n} [v(\tau) - R_e i(\tau)] d\tau \end{bmatrix} \end{aligned} \quad (8)$$

pseudo inverse를 이용하여 식 (7)은 다음 식 (9)와 같이 정리될 수 있다.

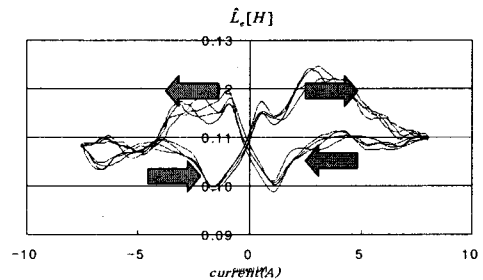
$$\begin{bmatrix} \hat{\alpha} \\ \hat{L}_e \end{bmatrix} = (A^T A)^{-1} A^T b \quad (9)$$

3. 실험 및 검토

리니어 컴프레서용 센서리스 제어기를 실현하기 위한 cpu로는 TMS320C2000을 사용하였다. 리니어 컴프레서는 에어컨 용도로까지 사용할 수 있도록 개발된 2.2kW 급의 리니어 모터를 내장하고 있다. 정격 입력전압은 220V이며 최초 실험을 위한 스트로크 명령치는 16mm로 하였다. 모터전압의 주파수는 항상 60Hz로 설정하였다. 초기 기동상태를 지나 정상상태 상황에서 식 (9)에 의해 추정된 리니어 모터의 매개변수 \hat{L}_e 이 그림 1에 있다. 스트로크나 전류의 변화에 따라 추정된 매개변수 \hat{L}_e 가 심하게 변한다. 인덕턴스는 자속을 전류로 나눈 값이며 스트로크에 따라 인덕턴스가 바뀌는 것은 마그네트 때문이다. 마그네트가 중심에서 멀어질수록 마그네트 자속이 증가하고 여기에 전류에 의한 자속이 더해져 코어의 자속밀도가 달라지게 된다. 또한, 전류 증가시 코어가 포화되면 자속은 증가하지 않아서 전류 값이 어느 이상 증가하면 인덕턴스는 감소한다.



(a) 스트로크에 따라 변하는 추정치 \hat{L}_e



(b) 전류에 따라 변하는 추정치 \hat{L}_e

그림 1. 추정치 \hat{L}_e 에 대한 실험 결과

스트로크를 측정하기 위해서 피스톤 위치센서를 설치하는 것은 쉽지 않고 가격상승의 원인이 된다. 또한, 일정한 모터 매개변수로 가정하여 추정된 스트로크는 작지 않은 오차를 유발하였다. 반면, 추정된 모터 매개변수를 이용하여 계산된

스트로크 추정치는 상당히 작은 오차를 발생시켰다. 그러나, 이 방법은 추정된 모터 매개변수를 저장하기 위한 커다란 메모리를 필요로 하는 단점을 갖고 있다. 본 논문에서는 이 문제를 해결하기 위한 한 가지 방안을 제시한다. 그림 2는 추정치 \hat{L}_e 에 대한 곡면도를 보여준다. 이 곡면은 말안장의 형태를 보여준다. 추정된 인덕턴스의 데이터 수를 줄이기 위해, 그림 2의 추정치 \hat{L}_e 은 다음과 같은 2차 곡면으로 근사화 시킨다.

$$S(i, x, L) : L = c_0 i^2 + c_1 x^2 + c_2 i x + c_3 i + c_4 x + c_5 \quad (10)$$

여기서, i 는 전류변수이고 x 는 스트로크변수이며 L 은 2차 곡면으로 근사화시킨 추정된 인덕턴스 함수를 나타낸다.

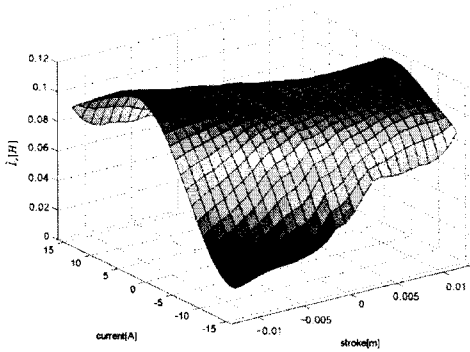


그림 2. 추정된 인덕턴스 \hat{L}_e 의 곡면도

Matlab을 이용하여 그림 2와 같은 실제 데이터를 가지고 풀어보면 그림 3과 같은 2차 곡면으로 근사화 시킨 추정된 인덕턴스 함수 L 을 얻을 수 있다.

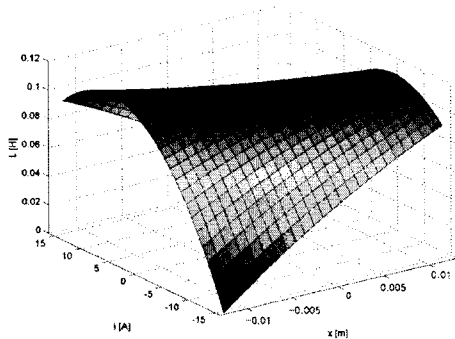


그림 3. 근사화된 추정 인덕턴스 L 의 곡면도

그림 3과 같이 근사화된 추정 인덕턴스를 사용한다면 메모

리 공간이 크게 줄어든다. 여러 조건에서 근사화된 추정 인덕턴스를 사용하였을 경우의 스트로크 추정 오차를 산출하였다. 상대적인 오차 비교를 위해 일정 모터 상수를 채용하였을 때의 스트로크 추정도 구하였다. 리니어 모터에 가해지는 전압과 전류에 따라 추정오차가 들쭉날쭉하지만 일정 모터 상수를 채용하였을 경우에는 5.83%의 평균오차를 발생하지만 근사화된 추정 인덕턴스를 사용하여 스트로크를 추정하였을 경우는 2.68%의 평균오차를 발생하였다.

4. 결 론

본 논문에서는 리니어 컴프레서를 위한 페루우프 센서리스 스트로크 제어시스템을 구성하였으며, 피스톤 위치를 정확히 알아내기 위해 모터 매개변수를 피스톤 위치와 모터 전류의 함수로 추정하였다. 이 매개변수 데이터는 ROM 테이블에 저장한 뒤 차 후 피스톤 위치를 정확히 알아내는데 사용되었다. 또한, 추정된 모터 매개변수의 데이터 크기를 줄이기 위해 2차원 곡면 함수로 근사화 하는 작업을 수행하였다. 실험을 통해 데이터 크기는 줄지만 추정 오차는 약간 커짐을 확인하였고, 향후 데이터 크기를 줄이면서 추정오차가 커지지 않는 제어 방식에 대한 더 많은 연구가 필요하다고 판단된다.

참 고 문 헌

- [1] Reuven Unger, "Linear compressors for non-CFC refrigeration," Proceedings International Appliance Technical Conference, May 13-15, 1996, Purdue University, West Lafayette, Indiana, USA
- [2] Robert Redlich, Reuven Unger, Nicholas van der Walt, "Linear compressors : motor configuration, modulation and systems," Proceedings International Compressor Engineering Conference, July 23-26, 1996, Purdue University, West Lafayette, Indiana, USA
- [3] Reuven Unger, "Linear compressors for clean and specialty gases," Proceedings International Compressor Engineering Conference, July 14-17, 1998, Purdue University, West Lafayette, Indiana, USA
- [4] Reuven Unger, "Development and testing of a linear compressor sized for the european market," Proceedings International Appliance Technical Conference, May 10-12, 1999, Purdue University, West Lafayette, Indiana, USA
- [5] Masayuki Sanada, Shigeo Morimoto, and Yoji Takeda, "Analyses for sensorless linear compressor using linear pulse motor," Proceedings Industry Applications Conference, pp. 2298-2304, Oct., 3-7, 1999