PWM인버터로 구동되는 냉장고용 선형압축기시스템의 특성해석 및 효율제어

Analysis and Efficiency Control of Linear Compressor System for Refrigerator Driven by PWM Inverter

손 장 경* · 전 태 원†
(Jang-Kyung Son · Tae-Won Chun)

Abstract - Recently, the linear compressors with the free piston driven by the linear motor have widely attention in the cooling apparatus such as a refrigerator due to high efficiency. The method of using triacs as a linear motor drive is not satisfactory to improve the efficiency of the linear compressor. In this paper, the performance of the linear compressor using a PWM inverter such as the efficiency is investigated with the variations of both mechanical resonant frequency and electrical resonant frequency. The control loop for controlling both the piston stroke and efficiency is suggested. Through simulation and experimental studies, the performance of both the stroke and angle controls for improving the efficiency of the linear compressor is verified.

Key Words : Linear compressor, Inverter, Stroke

1. 서 론

냉장고 에어컨 등 냉동·공조기기의 심장부라고 말할 수 있는 매우 중요한 압축기는 대부분이 왕복동식 압축기 또는 로터리 압축기를 사용하고 있다. 그런데 이 압축기들은 크랭크축 메커니즘에 의해 전동기의 회전운동을 피스톤의 왕복운동으로 바꾸주기 때문에 크랭크축 등에서 기계적인 마찰에 의한 기계적인 손실 때문에 압축기의 효율이 떨어지고 소음이 발생하는 문제점이 있다. 냉동·공조기기의 전체 소비전력에서 압축기가 차지하는 소비전력이 80% 이상을 차지하므로 압축기의 효율은 아주 중요한 문제이므로, 이 압축기의 효율을 증가시키기 위하여 10여년전부터 선형 압축기(Linear compressor)가 개발되기 시작하였다 [1]~[3]. 이 선형압축기는 프리 피스톤 구조로 되어 있어서 크랭크축 등에 의한 기계적인 손실을 감소시키고, 부하나 주위온도에 따라 피스톤의 스트로크(Stroke) 조절이 자유롭기 때문에 냉동·공조기기에 적용 시 소비전력 저감에 큰 효과가 있다. 피스톤에 영구자석을 연결하고 고정자 권선에 교류전류를 인가하여 피스톤을 좌우로 스트로크제어를 위하여 선형 영구자석형 동기전동기(LPMSM)를 사용한다 [4][5].

이 선형압축기의 LPMSM구동용으로 트라이악(Triac)을 사용하며, 이 트라이악의 지연각제어로 LPMSM의 고정자 전압 크기를 변화시키면서 피스톤 스트로크를 제어하는 방

식이 있다 [6]. 이 트라이악을 사용하는 방법은 트라이악 1개만을 사용하므로 전력회로가 간단하여 비용을 감소시킬 수 있다는 장점이 있으나, LPMSM의 고정자 전압만을 제어하므로 부하변화에 대하여 최대효율 제어를 할 수 없다는 문제점이 있다. 또한 이 트라이악의 출력전압 및 전류 파형에 왜곡이 많으므로 이 전압 및 전류로 계산하는 스트로크 값에 오차가 있을 수 있다는 문제도 있다. 따라서 근래에서는 선형압축기의 스트로크를 제어를 위하여 크기 및 주파수까지 변경시킬 수 있으며, 전압 및 전류 파형이 거의 정현파인 PWM 인버터를 사용하는 방식이 점차 사용되고 있다.

본 논문은 선형압축기의 LPMSM구동용으로 PWM인버터를 사용할 시, 선형압축기의 부하 및 피스톤 스트로크변화에 대한 기계적공진주파수의 변화를 분석한다. 다음은 인버터 주파수에 대한 선형압축기의 기계적 공진주파수와 전기적 공진주파수 비의 변화에 대하여 선형압축기의 효율 특성을 분석한다. 피스톤 스트로크제어와 함께 최대 효율제어를 위한 제어루프를 제시하고, 시뮬레이션 및 실험을 통하여 분석한 결과의 타당성을 확인한다.

2. 시스템 모델링

2.1 기계적 및 전기적 공진주파수

기계적 및 전기적 공진주파수 변화에 대한 선형압축기의 효율과 같은 성능을 분석한다. 먼저 선형압축기를 그림 1과 같이 MKC 시스템으로 등가시킬 수 있다.

그림 1의 기계적 모델링으로 선형압축기의 기계적 방정식은 다음과 식과 같이 표현된다 [7].

$$M \frac{d^2 x}{dt^2} + C \frac{dx}{dt} + Kx = \alpha i_s \quad (1)$$

* Dept. of Electrical Engineering, University of Ulsan, Korea

† Corresponding Author : Dept. of Electrical Engineering, University of Ulsan, Korea

E-mail : twchun@mail.ulsan.ac.kr

Received : August 29, 2013; Accepted : October 29, 2013

그림 1 기계적 모델링

Fig. 1 Mechanical modeling.

이 식에서 M 은 피스톤과 선형 압축기의 진동자 및 동조 스프링의 등가 질량이 포함된 운동질량을 의미하며, C 는 피스톤과 실린더 벽 사이에서 발생하는 점성 계수를, K 는 동조 스프링의 강성을 나타내는 기계적 스프링 상수 K_m 과 가스 스프링 상수 K_{gas} 로 구성된다. 이 기계적 스프링 상수 K_m 은 부하에 관계없이 거의 일정하지만 가스 스프링 상수 K_{gas} 는 단위 변위당 가스 힘의 변화이므로 이 값은 부하상태와 스트로크 값에 따라 항상 변화되는 상수 값이다. 따라서 기계적 스프링 상수 K_m 과 가스 스프링 상수 K_{gas} 로 구성된 K 는 부하와 스트로크 값에 따라 변화된다. 그리고 x 는 피스톤 스트로크(stroke)를 나타내며, i_s 는 LPMSM의 고정자 입력전류이고, a 는 전동기의 추력과 전류사이의 관계를 나타내는 모터 상수이다. 이 a 는 선형압축기의 피스톤위치에 따라 값이 달라지며 특히 피스톤이 고정자 극의 모서리에 지날 때 이 상수 값이 약간 감소되지만 그 변화폭이 1.5%이하이므로 본 논문에서는 일정한 상수로 가정한다 [8].

식(1)에서 스트로크 x 대신 피스톤 속도 $v = \int x dt$ 을 대입하고, 전류 i_s 를 정상상태에서 주파수영역으로 표시하면 다음 식(2)와 같다.

$$\bar{i}_s = \frac{1}{\alpha} \bar{Z}_m v \quad (2)$$

$$\bar{Z}_m = C + jM\omega \left[1 - \left(\frac{\omega_{mr}}{\omega} \right)^2 \right] = C + jM\omega [1 - \omega_{mr}^2] \quad (3)$$

여기서 ω_{mr} 은 인버터주파수 ω 에 대한 기계적 공진주파수 ω_{mr} 의 비로 정의하며, 기계적 공진주파수는 다음 식과 같이 표현된다.

$$\omega_{mr} = \sqrt{\frac{K_{gas} + K_m}{M}} = \sqrt{\frac{K}{M}} \quad (4)$$

식(4)에서와 같이 부하와 스트로크에 따라 변화되는 가스 스프링 상수 K_{gas} 때문에 기계적 공진주파수가 변화되므로, 가스스프링 상수의 변화에 대한 기계적 공진주파수가 변동하는 범위를 분석한다. 그림 2는 선형 압축기의 P-V (Pressure - Volume)선도와 피스톤의 변위 즉 스트로크를 나타낸 것이다. 이 P-V곡선에서 A-B는 압축구간, B-C는 토출구간, C-D는 팽창 구간, D-A는 흡입구간이며, P_s 는 흡입압력을 P_d 는 토출압력을 나타낸다. 이 스트로크에 대한 가스압력 곡선의 기울기가 가스 스프링 상수 K_{gas} 가 되며 스트로크의 한 주기 동안에도 이 K_{gas} 값이 변화한다. 따라서 토출압력 P_d 이 일정한 값을 유지한 상태에서 스트로크의 한 주기를 일정간격으로 30개 등분하고, 등분된 위상간격마

다 스트로크 값에 대한 가스압력곡선의 기울기 즉 K_{gas} 값을 계산하고 이 K_{gas} 값을 계속 더해 나간다. 스트로크의 한 주기가 되면 이 한주기 동안 더한 K_{gas} 값을 30으로 나누어 K_{gas} 값 평균치를 계산한다. 그리고 스트로크의 피크-피크값 및 토출압력 P_d 을 변경하여 위의 과정을 반복한다.

그림 2 가스스프링 상수 계산 방법

Fig. 2 Method of calculating the gas spring constant.

그림 3 K_{gas} 값의 변화Fig. 3 Variation of K_{gas} .

그림 4 기계적공진주파수의 변화

Fig. 4 Variation of mechanical resonant frequency

그림 3은 토출압력 P_d 를 최소 4 Kg/cm²에서 최대 9 Kg/cm²까지 1 Kg/cm² 단위로 증가시킬 때 스트로크 피크-피크값을 변화시키면서 계산한 K_{gas} 값을 보인 것이다. 이 그림을 보면 토출압력 P_d 가 증가할수록 K_{gas} 값이 증가되고, 또한 스트로크 피크-피크값의 변화에 따라 K_{gas} 값이 변화됨을 알 수 있다. 그림 4는 기계적 스프링상수 K_m 이 62500 N/m일 경우, 식(4)를 이용하여 기계적 공진주파수를 계산한 결과이며, 기계적 공진주파수는 최소 56.2 Hz부터 최대 64.2 Hz까지 변동됨을 알 수 있다.

그림 5는 단상 PWM인버터와 LPMSM의 고정자 철손을 무시하였을 경우 등가회로를 보인 것이다. LPMSM은 권선 저항, 권선인덕턴스, 피스톤 속도에 비례하는 역기전력으로 표현되며, 인버터와 LPMSM 사이의 커패시터 C_s 는 전동기의 유도성 무효전력을 보상하기 위한 것이다.

그림 5 선형전동기를 구동하는 단상 PWM인버터

Fig. 5 Single phase PWM inverter feeding linear motor.

그림 5로부터 PWM인버터의 출력 전압방정식은 다음과 같이 표현된다.

$$V_s = R_s i_s + L_s \frac{di_s}{dt} + \frac{1}{C_s} \int i_s dt + \alpha v \quad (5)$$

여기서 피스톤속도에 비례하는 역기전력 식은 $E = \alpha v$ 이다. 식(5)의 전압방정식을 정상상태 주파수영역으로 변환시키면 다음과 같이 유도된다.

$$\overline{V}_s = \overline{Z}_e \overline{i}_s + \alpha \overline{v} \quad (6)$$

$$\overline{Z}_e = R_s + jL_s\omega \left[1 - \left(\frac{\omega_{er}}{\omega} \right)^2 \right] = R_s + jL_s\omega [1 - \omega_{err}] \quad (7)$$

여기서 ω_{err} 은 인버터주파수 ω 에 대한 전기적공진주파수 ω_{er} 의 비이며, 전기적공진주파수는 다음 식과 같이 표현된다.

$$\omega_{er} = \frac{1}{\sqrt{L_s C_s}} \quad (8)$$

2.2 선형압축기 효율 식

LPMSM의 철손을 무시하였을 경우 선형압축기의 효율 식을 유도하기 위하여 먼저 식(2)의 전류 i_s 를 식(6)에 대입하면 인버터 출력전압을 피스톤 속도 v 로 표현할 수 있다.

$$\overline{V}_s = \frac{1}{\alpha} \overline{Z}_e \overline{Z}_m \overline{v} + \alpha \overline{v} \quad (9)$$

그림 6은 선형압축기의 위상도이다. 먼저 피스톤의 스트로크 x 를 Y-축으로 지정하면, 스트로크를 적분하여 구한 피스톤 속도 v 는 스트로크에 대하여 90° 위상 지연이 일어나므로 X-축이 된다. 전동기 역기전력 E 는 피스톤 속도 v 에 비례하므로 속도 v 와 동상이 된다. 식(5)의 전압방정식을 이용하면 인버터 출력전압 및 전류의 벡터를 표시한다. 피스톤 속도에 대한 고정자전류 위상 ϕ_m 과 인버터 출력전압 위상 ϕ_{sp} 는 기계적 공진주파수 비 ω_{mrr} 와 전기적 공진주파수 비 ω_{err} 에 따라 많이 변화된다.

그림 6 선형압축기 위상도

Fig. 6 Space phases of the linear compressor.

그림 6으로부터 선형압축기 입력전력 P_{in} 는 식 (11)과 같이 인버터 출력전압과 출력전류 값에 이 전압 및 전류의 위상값의 코사인 값으로 표현된다. 출력전력 P_{out} 은 식 (12)와 같이 전동기 역기전력과 입력전류 값과 역기전력과 전류의 위상값의 코사인 값으로 표현된다. 마지막으로 입력전력에 대한 출력전력의 비인 효율 식은 식 (13)과 같다.

$$P_{in} = |\overline{V}_s| |\overline{i}_s| \cos \theta_s = |\overline{V}_s| |\overline{i}_s| \cos (\phi_m - \phi_{sp}) \quad (11)$$

$$P_{out} = |\overline{E}| |\overline{i}_s| \cos \phi_m = \alpha |\overline{v}| |\overline{i}_s| \cos \phi_m \quad (12)$$

$$\eta(\%) = \frac{P_{out}}{P_{in}} \times 100(\%) \quad (13)$$

식 (13)의 효율을 구하기 위하여 위상 ϕ_m 과 위상 θ_s 의 식을 유도하여야 하지만, $\theta_s = \phi_m - \phi_{sp}$ 이므로 위상 ϕ_m 과 ϕ_{sp} 식을 유도하여 위상 θ_s 를 계산한다. 식(2), (3), (7), (9)를 사용하여 유도한 위상 ϕ_m 식과 ϕ_{sp} 식은 각각 다음과 같다.

$$\phi_m = \tan^{-1} \left(\frac{Mv(1 - \omega_{mrr})}{C} \right) \quad (14)$$

$$\phi_{sp} = \tan^{-1} \left[\frac{\omega M R_s (1 - \omega_{err}) + C L_s (1 - \omega_{mrr})}{C R_s - \omega^2 L_s M (1 - \omega_{err})(1 - \omega_{mrr}) + \alpha^2} \right] \quad (15)$$

3. 선형압축기 효율특성 및 제어

3.1 선형압축기 효율특성

피스톤 스트로크와 인버터의 출력전압, 전동기 전류와 함께 인버터주파수가 일정하다고 가정하였을 때, 식 (13)을 사용하여 기계적 및 전기적 공진주파수 비 변화에 대한 효율 변화를 관측한다. 그림 7은 전기적 공진 주파수 비 ω_{err} 를 0.8, 0.9, 1.0, 1.1, 1.2등 5단계로 변화시키면서, 각 ω_{err} 의 값에서 ω_{mrr} 를 0.8에서 1.2까지 증가시킬 경우 선형압축기의 효율을 보인 것이다. 전기적 공진 주파수 비의 변화는 효율에 전혀 영향이 없으며, 효율은 기계적공진주파수 비 ω_{mrr} 에 큰 영향을 받는다. 즉 ω_{mrr} 이 1을 경우 최대 효율이 발생되며, ω_{mrr} 이 1보다 더 클수록 효율이 감소되고 반대로 ω_{mrr} 이 1보다 작아질수록 효율이 감소됨을 알 수 있다.

그림 8은 전기적 공진주파수 ω_{err} 이 1일 경우 ω_{mrr} 를 1.0, 0.9, 1.1로 변화시켰을 때 PWM인버터 출력전압, 전동기전류 및 스트로크의 위상도를 각각 그린 것이다.

그림 8(a)와 같이 최대효율을 얻기 위하여 인버터주파수를 기계적 공진주파수와 일치시킨다. 이 경우 피스톤 스트로크와 전류의 위상차 θ_d 는 90° 가 된다. 기계적 공진주파수

그림 7 선형압축기 효율곡선

Fig. 7 Efficiency curves of the linear compressor.

그림 8 ω_{mrr} 변화에 대한 선형압축기 벡터위상도Fig. 8 Space phase at the linear compressor with a variation of ω_{mrr} .

가 인버터주파수보다 낮을 경우 ($\omega_{mrr} < 1.0$) 그림 8(b)와 같이 스트로크와 전류의 위상차 θ_d 가 90° 보다 더 커지며, 이 경우 θ_d 를 90° 로 유지시키기 위하여 인버터주파수를 감소시켜야 한다. 반대로 기계적 공진주파수가 인버터주파수보다 높을 경우 ($\omega_{mrr} > 1.0$) 그림 8(c)와 같이 스트로크와 전류의 위상차 θ_d 가 90° 보다 작아지므로 θ_d 를 90° 로 유지시키기 위하여 인버터주파수를 증가시킨다.

3.2 선형압축기 효율 및 스트로크 제어

효율향상을 위하여 시스템 공진주파수에 맞추어 기준전류의 주파수를 설정하고 PI제어기와 함께 전류추적오차를 최소화시키기 위하여 신경회로망보상기로 구성된 전류제어기를 제시하였으나 [9], 본 논문은 최대 효율 제어를 위하여 스트로크와 전류의 위상차 제어를 사용한다.

그림 9는 본 논문에서 제시한 선형압축기의 효율제어와

스트로크제어를 위한 제어시스템이며, 이 제어시스템은 효율 제어를 위한 위상각 θ_d 제어루프와 스트로크의 피크-피크 값 제어루프로 구성된다. 먼저 피스톤 스트로크는 다음 식과 같이 LPMSM의 역기전력 E 를 적분한 후 전동기 상수 α 를 나누어 계산하는데, 전동기 역기전력은 전동기 입력전압 V_m 에서 전동기 고정자 임피던스 전압강하분을 빼면 구할 수 있다.

$$x = \frac{1}{\alpha} \int E dt = \frac{1}{\alpha} \int (V_m - R_s i_s - L_s \frac{di_s}{dt}) dt \quad (16)$$

식(16)으로 계산된 스트로크를 사용하여 한주기 동안 스트로크의 피크-피크 값을 구하고 이 값을 스트로크 제어루프로 패환시킨다. 스트로크 비례적분(PI) 제어기를 거치고, 이 PI 제어기의 출력이 기준전압의 크기가 된다.

그림 9 선형압축기 제어루프

Fig. 9 Control loop of the linear compressor.

다음은 선형전동기의 최대 효율제어를 위하여 그림 8(a)와 같이 스트로크와 전류의 위상차를 90° 로 유지시키는 제어방식을 사용한다. 따라서 기준 위상차를 90° 로 설정하며, 실제 스트로크와 전류의 위상차 θ_d 를 구한 후, 이 위상차가 90° 되도록 P제어기를 사용한다. 인버터주파수의 급격한 변화를 방지하기 위하여, P제어기의 출력을 인버터주파수의 변화량 Δf 로 하고, 이 주파수 변화량과 직전 샘플링구간에서 출력된 주파수를 더하여 인버터 주파수를 계산한다. 이 주파수를 적분하여 기준전압의 위상각으로 사용한다. 스트로크 제어기에서 출력된 기준전압의 크기와 위상 제어기에서 출력된 기준전압의 위상각을 결합하여 계산된 최종 기준전압과 일정 주파수와 크기를 가지는 삼각파와 비교하여 인버터 PWM신호를 발생시킨다.

4. 시뮬레이션 및 실험결과

4.1 시뮬레이션 결과

본 논문에서 제시한 스트로크 및 효율 제어의 성능을 확인하기 위하여 시뮬레이션을 수행한다. 먼저 선형압축기의 LPMSM 정격 및 상수값은 다음 표와 같다.

표 1 LPMSM의 정격 및 상수

Table 1 Rating and parameters of LPMSM.

정격전압	220 [V]
정격전류	0.9 [A]
정격주파수	60 [Hz]
고정자 저항 R_s	10.4 [Ω]
고정자 인덕턴스 L_s	0.42 [H]
전동기 상수 a	71 [N/A]

그림 10 위상각제어의 응답에 대한 시뮬레이션 결과
Fig. 10 Simulation result for responses of angle control.

(a) 위상 제어 전

(b) 위상 제어 후

그림 11 위상각 제어 정상상태 응답 시뮬레이션 결과
Fig. 11 Simulation results for steady-state responses for angle control.

그림 10은 스트로크와 위상각 θ_d 제어의 과도응답특성에 대한 시뮬레이션 결과를 보인 것이다. 먼저 고정자전압을 인가하여 피스톤을 기동시킨 후, 기준 스트로크 (19.5 mm)를 입력시켜 스트로크제어를 수행한다. 스트로크가 기준치인 19.5 mm에 접근하였을 때, 다음 단계로 1.5초 시점에서 기준 위상차를 90°로 설정하면서 위상제어를 실행한다. 이 시뮬레이션 결과에서 보는 바와 같이 위상제어 전에는 인버터주파수가 60Hz에 위상각이 128°이며, 위상제어 실시 후에는 위상차를 90°로 제어하기 위하여 인버터 주파수를 58.4Hz로 감소시킴을 알 수 있다.

그림 11은 위상제어 수행 전과 수행 후 고정자 전류, 스

트로크, 기준 및 실제 위상의 정상상태 응답을 각각 보인 것이다. 위상 제어 수행 전에는 전류가 스트로크에 약 128° 앞서며, 위상 제어 수행 후에는 전류와 스트로크의 위상차가 90°로 감소되면서 전류크기가 감소되어 효율이 증가한다.

4.2 실험결과

냉장고용 선형압축기의 LPMSM구동용으로 전력형 FET로 구성된 단상 전압형인버터와 제어시스템은 30MHz 클럭 주파수에 16-비트 DSP TMS320LF2407로 구현하였다. LPMSM의 입력전압 및 전류는 증폭회로, 필터, DSP내부의 10-비트 A/D컨버터를 통하여 검출한다. 한편 입력전력은 아날로그 곱하기를 사용하여 직류링크 전압과 전류를 곱하여 계산한다. DSP로 위상 및 스트로크 제어하는 샘플링구간은 40μsec이다. 그림 12는 선형압축기의 내부사진이다.

그림 12 선형압축기 사진
Fig. 12 Photography of linear compressor.

(a) 위상제어 과도응답

(b) 위상제어 전 특성

(c) 위상제어 후 특성

그림 13 위상제어 시 실험결과
Fig. 13 Experimental results of angle control

그림 13은 토출압력 P_d 과 흡입압력 P_s 가 각각 6.7 Kgf/cm², -0.76 Kgf/cm²일 경우 위상제어 시, 스트로크와 전류의 위상차 θ_d , 인버터주파수에서 60Hz를 뺀 주파수 Δf , 인버터 입력전력 P_{dc} 에 대한 실험결과를 보인 것이다. 그림 14(a)를 보면 위상제어 전에는 위상차가 132°, 입력전력이 66W, 인버터주파수는 60Hz인 상태에서 10초 후에 위상제어를 수행하였다. 인버터주파수가 58.9Hz로 감소하면서 위상차가 기준값인 90°로 제어되었다. 그리고 입력전력이 66W에서 61.5W로 감소되므로 효율제어 전의 입력전력과 비교하면 약 6.8%가 감소됨을 알 수 있다. 그림 13(b)와 (c)는 위상제어 수행 전과 위상제어 수행 후의 정상상태응답을 보인 것이다. 위상제어 수행하였을 경우 수행 전의 실험결과와 비교하면 스트로크의 피크-피크는 19.5mm로 변화가 없고 위상차가 90°로 제어되면서 전류크기가 감소되었다.

5. 결 론

본 논문은 기계적공진주파수와 전기적공진주파수의 변화에 대하여 PWM인버터로 구동되는 선형압축기의 효율을 관찰하였다. 선형압축기를 최대효율로 동작시키기 위하여 인버터주파수를 기계적공진주파수에 맞추어 제어하여야 하며, 스트로크와 선형전동기 고정자 전류의 위상차가 90° 될 때 인버터주파수와 기계적공진주파수가 일치되었다. 그리고 압축기 토출압력과 스트로크의 크기에 대하여 가스스프링 상수의 변화와 기계적 공진주파수의 변화를 관측하였다. 스트로크 크기 제어 및 효율제어를 위한 위상 제어루프를 구성하였으며, 시뮬레이션결과를 통하여 주파수제어로 스트로크와 전류의 위상차를 90°로 제어되었으며, 피스톤 스트로크 역시 기준값에 잘 추정함을 확인하였다. 또한 16비트 DSP로 실험을 수행한 결과 90° 위상차 제어를 수행함으로써 효율제어 전과 비교하면 입력전력이 6.8%정도 감소됨으로써 선형압축기 효율이 약 6.8% 증가함을 확인하였다.

감사의 글

이 논문은 이 논문은 2012년도 울산대학교 연구비에 의하여 연구되었음

References

- [1] M. Sanada, S. Morimoto, and Y. Takeda, "Analysis for sensorless linear compressor using linear pulse motor," in Proc. IEEE-IAS, 1999, pp. 2298-2304.
- [2] H. K. Lee, W. H. Jung, and K. Park, "Development of the linear compressor for a household refrigerator," in Proc. ICEC, 2000, pp. 313-318.
- [3] M. Utsuno, M. Takai, T. Yaegashi, et al., "Efficiency characteristics of a linear oscillatory actuator under simulated compressor load," in Proc. LDIA, 2001, pp. 264-267.
- [4] J. Wang, Z. Lin, and D. Howe, "Analysis of a short-stroke, single-phase, quasi-Halbach magnetized tubular permanent magnet motor for linear compressor application," IET Electr. Power Appl., vol. 2, no. 3, pp. 193-200, 2008.
- [5] C. Junge, F. Senicar, R. Wegener, and S. Soter, "Pressure control of a nonlinear system with a linear-PMSM and a standard inverter," in Proc. IEEE-IEMDC, 2009, pp. 83-88.
- [6] Z. Peng, L. Zhihai, and Z. Shuiying, "Control system of linear compressor based on bidirectional triode thyristor," in Proc. IEEE-ICMTMA, 2011, pp. 782-785.
- [7] S. A. Kim, S. G. Lee, D. G. Park, S. I. Byun, and Y. H. Cho, "Study on the improved modeling of a linear motor system for linear compressor considering the magnetic nonlinearity," in Proc. IEEE-PEDS, 2013, pp. 564-568.
- [8] K. Park, F. Hong, and H. K. Lee, "Linear motor for linear compressor," in Proc. International Compressor Engineering Conference, 2002, pp. 1544-1549.
- [9] Z. Lin, J. Wang, and D. Howe, "A learning feed-forward current controller for linear reciprocating vapor compressors," IEEE Trans. Ind. Electron., vol. 58, no. 8, pp. 3383-3390, Aug. 2011.

저 자 소 개

손 장 경 (孫壯庚)

1978년 10월 3일생. 2003년 울산대학교 전기공학과 졸업(학사). 2005년도 동 대학원 전기전자공학과 졸업(석사). 2005년~2008년 대구경북과학기술원 연구원, 2009년~2011년 엔피엔연구소 과장, 현재 울산대학교 대학원 전기공학부 박사과정

전 태 원 (全泰園)

1959년 1월 30일생. 1981년 부산대 전기공학과 졸업(학사). 1983년 서울대학교 대학원 전기공학과 졸업(석사). 1987년 동 대학원 전기공학과 졸업(박사), 2005년 버지니아공대 방문교수, 현재 울산대 전기공학부 교수