

선형 압축기 시스템 구동용 공진형 인버터의 효율 개선을 위한 손실 추정

김성안*, 장진학*, 김광희*, 박대근*, 이상건*, 조윤현
 동아대학교*

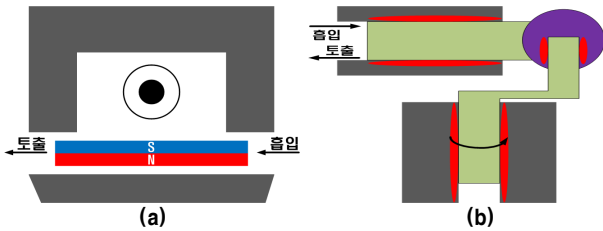
The Loss Estimation of Resonant Inverter
 for a Linear Compressor System Driven to Improve Efficiency

Sung-An Kim*, Jin-Hak Jang*, Kwang-Hee Kim*, Dae-Geun Park*, Sang-Gun Lee*, Yun-Hyun Cho*
 Dong-A University*

Abstract - 본 논문은 선형 압축기 구동용 시스템의 손실 저감을 위한 공진형 인버터의 설계에 대하여 연구 하였다. 공진형 인버터 손실 저감을 위해 선형 액츄에이터의 등가모델 파라메타를 유한요소해석으로 제시하고, 비선형 특성을 고려한 직렬 공진형 인버터의 손실을 추정하였다.

1. 서 론

현재 냉동, 공조기기분야에서 냉매에 의한 오존층 파괴로 인한 대처 방안으로 냉동성이 현저히 떨어지는 대체냉매, 자연냉매 보다 압축기를 이용한 냉매 방식이 연구·개발되었다. 그 중에서도 선형 압축기(linear Compressor)는 회전 모터를 직선운동으로 바꾸는 왕복복식 압축기와는 달리 피스톤이 리니어 모터에 의해 직접 구동되는 압축기이다. 운동변화에 따른 마찰 저항을 적고 수명이 길며 기계적 손실이 적어 효율이 높은 선형압축기를 절전형 냉장고에 적용하고 있으며, 구조적으로 간단하며, 운전특성이 우수한 장점을 가진다. 왕복복식 모터(a)와 리니어 모터(b)의 단면도를 나타내고 있다.



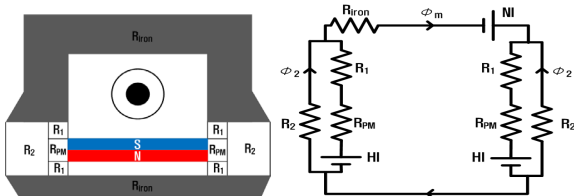
<그림 1> 왕복복식 모터(a)와 리니어 모터(b)의 단면도

절전형 냉장고 전체 시스템의 소비전력의 80%이상을 차지하는 선형 압축기는 차세대 핵심 절전 기술이 요구된다. 본 논문에서는 선형 모터의 자기 회로 및 전자계 해석을 통해 선형 모터의 특성 및 성능을 파악하고 선형 모터의 비선형성을 고려한 손실 분석과 실험결과를 비교 분석하여 제어기 효율 개선을 위한 손실 추정을 하였다.

2. 본 론

2.1 리니어 모터의 자기 등가회로 모델링

그림 2는 리니어 모터의 등가회로를 나타낸다.[1]



<그림 2> 자기 등가회로 모델링

여기서,
 R : electrical resistance
 Φ : flux in the air gap
 H : coercive force
 N : number of turns
 I : current

리니어 모터의 전자기적 힘은 코일과 영구자석 사이에서 의존한다. 등가회로를 Co-Energy(W)로 나타내면 식(1)과 같다.

$$W(i_{V_{pml}}, i_{V_{pmr}}, i, x) = \int_c^e dw(i_{V_{pml}} = i_{V_{pmr}} = 0, x) + \int_l^e dw(i_{V_{pmr}}, i_{V_{pml}} = 0, i = I, x) + \int_r^e dw(i_{V_{pml}}, i = I, i_{V_{pml}} = I_{V_{pmr}}, x) \quad (1)$$

여기서,
 c : center(rotor position)
 r : right(rotor position)
 l : left(rotor position)
 N : number of turns
 I : current
 x : displacement(mm)

전자기적 힘은 Co-Energy를 거리에 대하여 편미분하면 다음 식(2), 식(3)과 같다.

$$F = \frac{\partial W}{\partial x} \Big|_{i_{V_{pml}}, i_{V_{pmr}}, i} \quad (2)$$

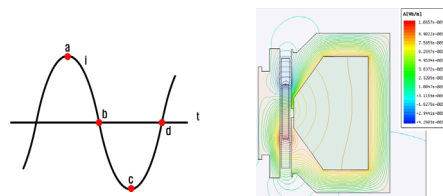
$$F = -\frac{2\pi r \mu_0}{l} H_o I_p N I - \frac{2\pi r \mu_0}{l} \frac{x}{a} (H_o I_p)^2 + \frac{2\pi r \mu_0}{l} \frac{2x}{h-l} (NI)^2 \quad (3)$$

리니어 모터는 전자기적 힘은 전류와 위치에 따라 변화하며 이를 페러데이 법칙을 적용하면 식(4)와 같다. 이를 통해 리니어 모터는 전류와 이동자의 위치에 의존하는 것을 알 수 있다.

$$e = (N^2 \frac{\pi r \mu_0 a}{l_1}) \frac{di}{dt} - (\frac{2\pi r \mu_0}{l_1}) \frac{dx}{dt} \quad (4)$$

2.2 리니어 모터의 전자계 해석

리니어 모터는 입력전류와 이동자의 위치에 따라 인덕턴스가 비선형적으로 변화 한다. 그림 3은 리니어 모터의 파라메타를 유한요소법으로 해석한 자속선도 결과이며 표 1은 전류 변화량에 따른 파라메타 관계를 나타낸다.



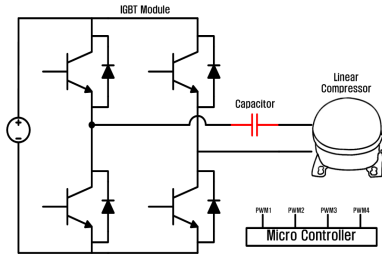
<그림 3> 이동자의 위치에 따른 자속선도

<표 1> Parameter Relation

Time	Current	Rotor Speed	Moving Force	Inductance(mH)
a	Max	Max	Max	
b	Zero	Zero	Zero	-224~224
c	Max	Max	Max	
d	Zero	zero	Zero	

2.3 선형 압축기의 공진형 인버터 제어기 설계

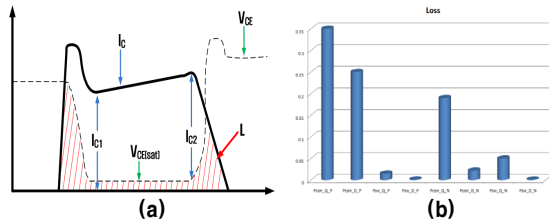
그림 4는 제어기의 효율 향상과 IGBT의 스트레스를 줄이기 위하여 직렬 공진 이용한 선형 압축기 공진형 인버터 제어기를 설계하였다. 리니어 모터의 기계적 주파수와 전기적 주파수의 공진을 위해 커패시터를 이용하였다.



〈그림 4〉 선형 압축기의 직렬 공진형 인버터

2.4 선형 압축기 공진형 인버터 제어기 손실 분석

선형 압축기 공진형 인버터는 Micro controller 소비전력과 IGBT의 스위칭 손실로 구분할 수 있다. 소비전력손실이 적은 Micro controller 비해 IGBT의 경우 PWM제어를 이용하므로, 한 펄스마다 전류 파형이 다르고, 스위칭에 따라 전체 손실에 영향을 준다. 일반적으로 IGBT의 전력 손실은 IGBT가 포화 영역에서 동작하고 있을 때의 정상 손실과 턴-온 및 턴-오프시의 과도적인 영역에서의 스위칭 손실로 나누어진다. 그림 5(a)는 1펄스분의 전압(V_{CE}), 전류 파형(I_C)와 이에 대응하는 전력손실(L)로 나타내며, 그림5(b)는 IGBT모듈의 P측, N측의 특성을 고려한 IGBT 부분별 전력손실이다.[2]



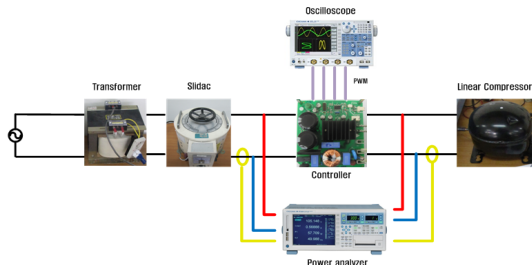
〈그림 5〉 전력손실(a)과 IGBT 부분별 전력 손실(b)

IGBT 모듈의 특성곡선을 통한 비선형적인 손실은 식(5)와 같다.

$$\begin{aligned}
 \text{Transistor Conduction Loss}(t) &= V_{CE(sat)}(t) \times I_C(t) \\
 \text{Transistor Turn On Loss}(t) &= E_{ON}(t) \times f \\
 \text{Transistor Turn Off Loss}(t) &= E_{OFF}(t) \times f \\
 \text{Diode Conduction Loss}(t) &= V_d(t) \times I_F(t) \\
 \text{Diode Switching Loss}(t) &= E_{rr} \times f
 \end{aligned}
 \tag{5}$$

2.4 시뮬레이션 및 실험

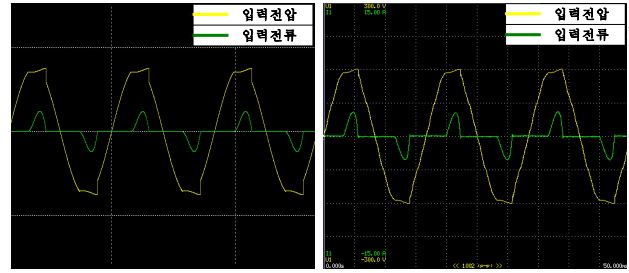
본문에서는 리니어모터의 특성과 시뮬레이션의 검증을 확인하기 위해 그림 6과 같이 전력분석장치를 구성하여 실험하였다.



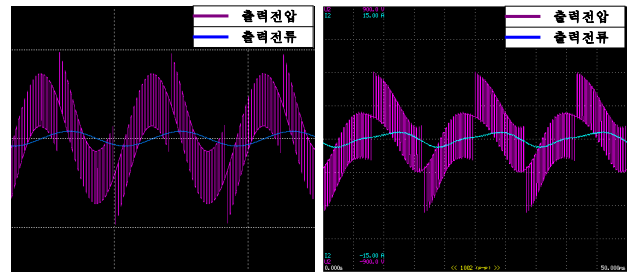
〈그림 6〉 전력분석장치의 구성도

2.5 결과 비교

선형 압축기 구동용 시스템의 효율 개선을 위한 손실 추정의 결과를 도출하기 위해 공진형 인버터의 입력측 전압, 전류 및 출력측 전압, 전류를 시뮬레이션과 실험결과는 그림 7과 그림 8과 같다. 출력측 전압과 전류는 90° 위상차를 보이며 공진하며, 스위칭 주파수는 3KHz, 전류는 60Hz로 리니어모터는 구동된다.



〈그림 7〉 입력전압, 입력전류



〈그림 8〉 출력전압, 출력전류

표 2는 시뮬레이션결과 및 실험결과를 비교 분석한 결과이다. 공진형 인버터의 손실은 비선형성을 고려한 시뮬레이션 손실 추정과 실험결과 비교하면 각각 3.4W, 3.3W이다.

〈표 2〉 Comparative Analysis

Item	Simulation		Experiment	
	Input	Output	Input	Output
U[V]	109	201	109	196
I[A]	1.26	0.95	1.23	0.643
-U _{pk} ~+U _{pk} [V]	-151~151	-484~460	-151~151	-506~456
-I _{pk} ~+I _{pk} [A]	-3.21~3.21	-1.43~1.43	-3.27~3.27	-1.21~0.9
P[W]	91.6	88.2	90.8	87.5
η[%]		96.3		96.4
Loss[W]		3.4		3.3

3. 결 론

본 논문은 선형 압축기 구동용 시스템의 손실 저감을 위한 공진형 인버터의 설계에 대하여 선형 액추에이터의 등가모델의 파라미터를 유한 요소법 해석하고, 비선형 특성을 고려한 직렬 공진형 인버터의 손실을 추정하였다. 시뮬레이션과 실험을 비교분석함으로써 효율 개선을 위한 손실 추정의 타당성을 입증하였다.

감사의 글

이 논문은 2010년도 정부(교육과학기술부)의 재원으로 한국연구재단의 기초연구사업 지원을 받아 수행된 것임 (2010-0024843)

[참 고 문 헌]

- [1] N. Chen, Y.J. Tang, Y.N. Wu, X. Chen, L. Xu, "Study on static and dynamic characteristics of moving magnet linear compressors", Cryogenics, 47, 457-467, 2007
- [2] Powersim Instrument, PSIM User's Guide, 2006