

시스템 에어컨용 압축기의 압력과 토크의 상관 관계 해석

김현재, 이승호, 김종수, 이병국
 성균관대학교 정보통신공학부

Analysis of Correlation Between Pressure and Torque for Compressor of System
 Air-Conditioner Application

Hyun-Jae Kim, Seung-Ho Lee, Jong-Soo Kim, Byoung-Kuk Lee
 School of Information & Communication Engineering, Sungkyunkwan University

Abstract - 본 논문에서는, 토크가 불안정한 에어컨 압축기 구동용 매입형 영구자석 동기전동기 (IPMSM)의 최적 구동을 위해서 압축기의 토크를 추정하는 방법을 제시한다. 압축기의 구조적 특성으로 인해 알아내기 어려운 토크 정보를 상대적으로 알아내기 쉬운 압력정보로부터 구할 수 있는 압력-토크 상관관계를 이론적으로 분석한다.

1. 서 론

최근 생활수준의 향상으로 사람들은 계절에 상관없이 쾌적한 생활을 영위하려 하고 있다. 특히 이러한 생활에 핵심이 되는 기구로서 에어컨을 들 수 있다. 에어컨은 압축식 냉동 사이클로 구성되어 있으며 특히 압축기가 핵심적인 역할을 담당하고 있다. 그리고 압축기의 저진동, 저소음 기술은 사람들을 쾌적하게 느끼게 하는 필수 요소이다.

하지만 압축기는 구조적 특성으로 인해 토크가 불안정하게 발생한다. 압축기에서 토크가 일정하게 발생하지 않으면 속도리플, 소음 및 진동, 고조파 등의 문제를 야기한다. 때문에 압축기에서 발생하는 토크를 검출해서 순시적으로 토크를 제어한다면 위와 같은 문제들을 해결할 수 있다. 그러나 압축기의 구조적 특성으로 인해 정확한 부하토크를 직접 센싱하기 어렵다.

이러한 문제를 해결하기 위해 현재까지 다양한 연구가 수행되었다. 에어컨은 아니지만 직접 순시 토크 제어 기법을 통한 유압 펌프용 SRM의 압력 제동 구동에 관한 연구가 수행되어 펌프 압력 제어의 동특성을 향상시키고 균일한 토크를 발생시켜 토크 리플을 억제하고 있다 [1]. 또한 편심 무게 부하를 갖는 영구자석 동기 전동기의 속도리플을 저감시키는 기법 등이 연구되었다 [2]. 이 연구에서는 사인파 보상법, 부하토크 추정기를 이용한 방법 및 기준모델 제어기를 이용한 속도제어기 등이 제안되었다. 이 중 기준모델 제어기를 이용한 속도제어기의 특성이 가장 우수한 결과를 나타내며 이를 적용하기 위해서는 플랜트의 정확한 특성 모델링이 요구된다.

본 논문에서는 최적 모터 토크 제어를 위해 모터와 부하토크의 차이에 따른 속도리플 발생 양상을 이해하고 냉동공조 시스템과 로터리 압축기의 물리적 구조를 분석한다. 이를 바탕으로 상대적으로 알아내기 쉬운 압력을 센싱하고, 센싱된 압력을 토크로 변환할 수 있는 압력-토크 상관관계를 해석한다. 해석 결과를 바탕으로 압축기의 정확한 모델링을 수행하지 않더라도 압력 센싱을 통해 실제 압축기의 토크와 동일한 토크 특성을 구할 수 있으므로 기준모델 제어기 등의 모델에 직접 적용 가능한 장점을 갖는다.

2. 본 론

2.1 토크 리플의 영향

압축기에서 발생하는 토크 리플이 속도에 미치는 영향을 확인하기 위해 모터토크 (T_M)와 부하토크 (T_L)를 그림 1(a)와 같이 가정한다.

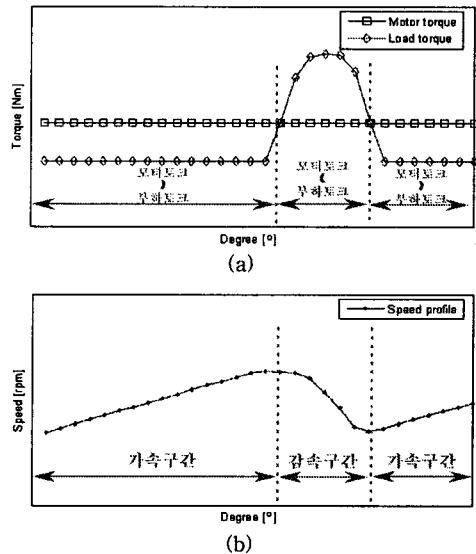


그림 1. 모터 및 부하토크 차이에 따른 속도리플
 (a) 모터 및 부하토크 프로파일 (b) 속도리플

모터토크와 부하토크의 크기차이에 따른 속도의 변화는 그림 1(b)와 같고, 모터토크가 부하토크보다 큰 경우 ($T_L < T_M$)에는 속도가 가속되며 부하토크가 큰 경우 ($T_L > T_M$)에서는 속도가 감속된다.

이렇게 모터와 부하토크의 차이에 따른 속도리플이 발생되며, 인버터가 일정한 전력을 공급할 경우 속도 리플은 식 (1)과 같이 나타난다.

$$\omega = \frac{P}{T} \quad (1)$$

여기서, P 는 출력, ω 는 각속도, T 는 토크를 나타낸다.

에어컨 실외기용 압축기는 냉매 압축과정의 고유한 특성으로 인하여 모터의 기계각 1회전 당 토크가 매우 비선형적인 특성을 가지므로 속도리플의 저감을 위해서 부하 토크의 변화를 추종하도록 순시적으로 모터 토크를 제어하여야 한다. 따라서 압축기의 부하 토크 변화를 분석하기 위해서 에어컨 시스템 냉동 공조 사이클의 원리와 압축기의 기계적 구조를 분석한다.

2.2 냉동 공조 사이클 분석

냉동 공조 사이클에서 압축기는 냉매에 압력을 인가하여 실내기, 실외기를 순환하게 하는 역할을 하는 에어컨의 핵심 부품이며, 공조장치 전체전력소비의 80-90%를 차지하고 있어 에너지 절감기술개발과 환경기술개발의 핵심이 되는 기기이다.

그림 2는 에어컨의 냉동 공조 사이클을 나타낸다. 저온 저압의 기체가 압축기를 통과하면서 고온 고압의 증기로 변환된다. 이 증기는 응축기로 보내지고 응축기에서 열을 방출하게 되어 증기는 고압의 액체로 변하게 된다. 이후 팽창밸브를 통과한 액체는 증발기를 통과하면서 다시 저온 저압의 기체로 변하게 되며 다시 압축기를 통과하여 위의 사이클을 반복한다. 증발기에서 고압의 액체가 증발하면서 주위의 열을 빼앗아감으로써 공기를 냉각시킨다.

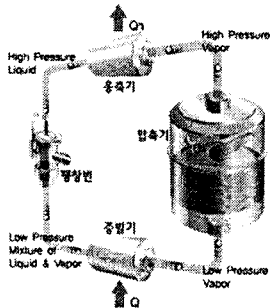
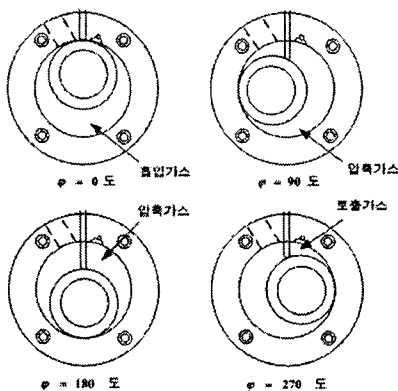


그림 2. 에어컨의 시스템 다이어그램 [6]

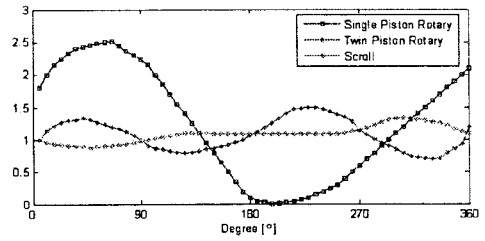
따라서 압축기는 이러한 냉동 공조 사이클을 구동하기 위하여 매우 복잡한 내부 기계적 구조를 가지며, 이로 인하여 비선형적인 토크 프로파일을 나타낸다.

2.3 압축기의 기계적 구조

본 절에서는 로터리 압축기의 기계적 분석을 통해 에어컨용 압축기의 불일정한 압력 및 토크 발생원인을 분석한다.



(a)



(b)

그림 3. (a)로터리 압축기의 사이클 (b)부하토크

그림 3(a)는 단일 피스톤 로터리 압축기의 기계각 한 사이클에 대한 압축과정을 나타내며, 이에 따른 압축기 내부구조 및 압력 발생 양상을 보여준다. 냉동 사이클 내에서 냉매가스의 종류와 상태에 따라 가스의 압력은 다르게 나타나고 롤러의 회전각이 0도일 때 가스압력은 흡입압력과 동일하며 회전각이 커질수록 가스압력은 높아지며 토출 시 가장 크다. 가스의 압력이 변화함에 따라 가스 압축 시 필요한 힘은 더 커지게 되며 발생되는 부하토크 또한 커지게 된다. 압력은 360도를 주기로 바뀌며 이로 인해 압축기는 그림 3(b)와 같이 불일정한 토크를 발생시키게 된다.

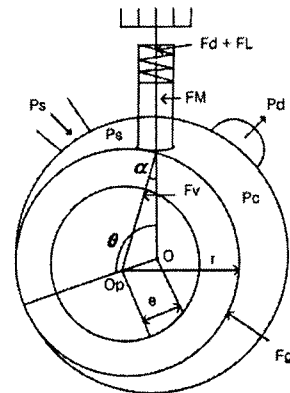


그림 4. 압축기에 작용하는 압력과 힘

그림 4는 압축기의 구조에 따른 압력과 힘을 나타내며 이를 분석함으로써 압축기에 작용하는 부하 토크의 종류를 확인할 수 있다.

로터리 압축기에서는 흡입 과정과 압축 과정이 동시에 일어나며, 1회전 당 1회의 흡입 과정과 1회의 압축 및 토출 과정이 이루어진다. 이러한 과정에서 압축기에는 흡입 압력 (P_s), 토출 압력 (P_d), 그리고 실린더 내부의 압력 (P_c)가 작용하며 이러한 압력들에 의해 압축기 내부에 힘이 작용하며 이는 곧 부하 토크로 작용한다. 압축기에 작용하는 힘으로는 가스 압축 시에 필요한 힘 (F_g), 베인과 롤러의 접촉으로 인한 접촉력 (F_v), 기계적 마찰력 (F_f)가 있다. 또한 실린더의 중심점 (O)와 롤러의 중심점 (O_p) 사이거리를 편심량 (e)라 하는데 이는 로터리 압축기에서의 부하 결정에 중요한 영향을 미친다.

2.4 압력-토크 상관관계 해석

본 절에서는 위에서 살펴본 압력 및 힘들을 바탕으로 압축기용 IPMSM 모터의 최적 토크제어를 위해 압력정보를 토크정보로 변환할 수 있는 압력-토크 상관관계를 이론적으로 해석한다.

압축기에 작용하는 부하 토크로는 가스압축토크 (T_g)와 베인 접촉 토크 (T_c) 그리고 기계적 마찰 토크 (T_f)가 있으며 이 중 가스 압축 토크가 가장 큰 비중을 차지한다. 가스압축 시 필요한 힘 (F_g)와 토크 (T_g)는 다음과 같이 나타낸다.

$$F_g = 2hr(P_c - P_s)\sin(\theta + \alpha)/2 \quad (2)$$

$$T_g = eF_g\sin(\theta + \alpha)/2 \quad (3)$$

여기서 $2hr$ 은 롤러의 단면적 넓이를 나타낸다. θ 는 롤러 축의 회전각, α 는 롤러중심점과 베인노즈부의 중심점선분이 축과 이루는 각도이다. 그리고 P_c 는 변수로서 압축실의 압력을 나타내고 흡입압력 (P_s)에서부터 토출압력 (P_d)가 될 때까지 값을 나타낸다. 이렇게 롤러 단면적에 압력차가 작용함으로써 압축기 부하로써 힘이 작용한다. 그리고 가스 압축 토크 (T_g)는 그 힘에 편심량 (e)를 곱해주어 나타낸다.

그리고 베인과의 접촉에 의한 힘 (F_v)과 토크 (T_v)는 다음과 같이 나타낸다.

$$F_v = (F_d + F_k + F_m)/\cos\alpha \quad (4)$$

$$T_v = -eF_v\sin(\theta + \alpha) \quad (5)$$

여기서 F_d , F_k , F_m 은 베인에 작용하는 힘으로서 F_d 는 토출압력이 베인에 작용하는 힘, F_k 는 스프링에 의해 작용하는 힘, 그리고 F_m 은 베인의 관성력을 나타낸다. 역시 베인 접촉 토크 (T_v)는 위 힘에 편심량 (e)를 곱해주어 나타낸다.

마지막으로 롤러의 기계적 마찰 토크 (T_f)는 식(6)과 같다.

$$T_f = \xi T_g(\text{avg.}) \quad (6)$$

기계적 마찰 토크 (T_f)는 가스 압축 토크(T_g)의 평균값과 감쇠계수 (ξ)의 곱으로 간단히 나타낼 수 있으며, 감쇠계수는 물체의 감쇠상수, 물체의 강성, 질량으로 구성되며, 기계적 마찰 토크 (T_f)가 감쇠계수에 의해 상쇄된다는 것을 의미한다. 압축기의 발생토크 중 부하 베인 접촉에 의한 토크(T_g)와 기계적 마찰성분인 베인과 롤러의 상하단부 마찰력, 롤러와 실린더간 접촉점에 발생하는 마찰력, 편심축과 롤러간 유막에 의한 마찰모멘트, 롤러상하단의 냉동기유에 의한 마찰모멘트, 베인 모서리부 수평마찰력, 롤러가 베인에 작용하는 수직력등은 가스압축에 의한 토크 (T_g)에 비해 무시 가능할 정도로 작아 전체토크 수식에서 미미한 영향을 끼치므로 압력과 토크 상관관계 파악 시 고려하지 않는다.

이렇게 압축기에는 T_g , T_c , T_f 의 부하가 작용하며, 이 중에서 가스 압축 시 작용하는 부하토크 (T_g)가 전체 부하의 80%이상으로 가장 크다. 이러한 가스 압축 토크 (T_g)는 실린더 내부의 압력 (P_c)을 변수를 가지고 있고 이는 흡입압력 (P_s)에서부터 토출압력 (P_d)까지의 변화하는 값을 가진다. 즉, 이러한 압력의 변화에 따라 가스 압축 토크 (T_g)가 변화되므로, 압력 (P_c)의 변화에 의해 가스 압축토크 (T_g)를 구해내어 압력-토크 상관관계를 구할 수 있다.

3. 결 론

본 논문에서는 에어컨용 압축기의 속도리플, 소음, 진동 등의 저감을 위해 모터와 부하 토크의 차이로 인한 속도리플발생 특성을 분석하였다. 또한 압축기의 기계적 구조를 바탕으로 압축기에 작용하는 힘과 압력을 통해 압력-토크의 상관관계를 이론적으로 분석하였다. 취부하기 힘든 토크센서 없이 상대적으로 쉬운 압력센서를 통해 토크를 알아냄으로써, 압축기 구동용 모터의 최적 토크 제어가 가능하여 고성능 압축기 구동에 기여할 것으로 기대된다.

[참 고 문 헌]

- [1] 이동희, 석승훈, 양가령, 안진우, "압력측정기법과 직접순시 토크측정기법을 통한 유압펌프용 SRM의 압력제어구동," 전력전자학회논문지, vol. 13, no. 3, pp. 171-178, 2008년 6월
- [2] 박정우, 김종무, 이기욱, "편심 무게 부하를 갖는 영구자석 동기 전동기의 속도리플 저감기법 분석," 대한전기학회논문지, 전기기기및에너지변환시스템부문B, vol. 53, no. 3, pp. 164-172, 2004년 3월
- [3] 조성욱, 마영찬, 석종원, "압축기 부하의 동적거동에 대한 연구," 대한설비공학회논문지, 1995년도 동계학술발표 논문집, pp. 349-351, 1995년 11월
- [4] Li Yang, Jihong Wang, Jia Ke, "Development Of A Mathematical Model For A Scroll Type Air Motor," ICSE 2006, pp. 519-523, 5-7 Sept, 2006
- [5] 압축기 공학, 부산대학교, LG전자
- [6] 새협기계 Web Page. [Online]. Available: <http://www.i3we ll.com/>