

부하 토크 보상을 통한 에어컨용 Single Rotary Compressor의 저진동 저속제어

임 선경, 임 준영, 박 태영
LG전자 AC연구소 선행제어 그룹

Load Torque Compensation for Low Vibration & Low Speed Control of Air-Con Single Rotary Compressor

Lim SunKyoung, Lim JunYoung, Park TaeYoung
Advanced Control Group, AC Lab, LG Electronics

ABSTRACT

가정용 인버터 에어컨에 사용되는 싱글 피스톤 압축기는 가격에 저렴한 장점이 있지만, 한 회전 당 냉매를 1회 압축, 토출하므로 이에 따른 부하변동이 심해 진동이 심하다는 단점이 있다. 싱글 피스톤 압축기는 고속운전 시에는 관성에 의해 진동이 작지만, 에어컨의 효율을 높이기 위해 압축기를 저속으로 운전할 경우 진동이 심해, 소음 증대와 배관 소손의 문제점이 발생한다. 이러한 문제를 해결하기 위해 싱글 피스톤 압축기 내의 BLDC 모터가 냉매를 압축, 토출 하는 시점을 검출하여, 인버터가 부하변동을 보상하여 저속 운전 시에도 소음 및 진동을 저감하는 제어 기술을 개발하였다. 부하 토크 변동 보상을 적용하여 기존 35Hz가 최저 운전 주파수였던 싱글 피스톤 압축기를 15Hz까지 낮추어 운전이 가능하므로 에어컨의 저전력 고효율 운전이 가능하다.

1. 서론

기존 LG전자 및 일본 가전업체에서는 싱글 피스톤 압축기의 부하패턴을 모사하여 전류제어기에 전향제어(Feed forward)를 통해 부하를 보상하였으나, 부하 변동 패턴의 위상과 크기가 실제 부하와 잘 맞지 않으므로 인해, 저속 운전 시 진동저감이 잘 되지 않는 문제가 있었다.

LG전자에서는 부하 토크를 상태 관측기(State Observer)^[2~7]를 설계하여 실시간으로 부하를 검출하여 보상하려는 연구를 수행하였으나, 상태관측기의 중요 입력인 압축기의 회전속도 정보가 부정확하여 실제 적용은 실패하다. 모터의 회전속도 정보가 부정확한 원인은 모터의 회전속도를 센스리스 알고리즘^[1]으로부터 추정하기 때문에 실제 속도와 추정 속도 간에 오차 및 위상지연이 존재하기 때문이었다.

본 논문에서는 기존의 부하패턴 전향제어기를 개선하여, 압축기에서 발생하는 부하토크가 BLDC 모터의 속도 맥동으로 나타나므로, 인버터에서 실시간으로 속도 맥동을 검출하여, 속도맥동이 항상 작아지는 방향으로 부하패턴의 크기가 자동으로 변화도록 함으로써, 진동저감 효과가 상당히 크며 부하가 급격하게 변하는 상황에서도 진동 저감효과를 극대화 하였다. 이로 인해 싱글 피스톤 압축기로 운전이 불가능 했던 저속, 저전력 영역(35Hz~15Hz)의 운전이 가능해 졌다. 에어컨의 운전 영역 확대(기존 35Hz~110Hz, 확장 15Hz~110Hz)로 인해 에어컨의 에너지 효율을 높일 수 있으며, 저 냉방영역의 운전이 가능하므로 에너지 절약 효과가 증대되며, 기존의 단순 전향제어

부하토크 보상방식보다 진동 저감효과가 매우 뛰어나기 때문에, 에어컨 실외기 및 배관의 소음 및 내구성이 향상된다.

개발기술의 경제·산업적인 파급효과는 에너지 효율 등급제 표시, 대기 전력 1W이하, Harmonics 규제 등 가전제품의 내수, 수출에 대하여 에너지 저감 및 고효율 제품에 대한 요구가 점점 증가 되고 있는 상황에서 고효율 에어컨의 개발이 가능해짐으로써 국내외 소비자의 요구 충족 및 에어컨 수출 시장 확대가 가능하며, 高價의 스크롤 압축기만이 운전 가능했던 저속 영역을 低價의 싱글 피스톤 압축기로 운전 대체가능하므로, Cost Down 효과가 크며, 에너지 사용량 및 CO2 가스 배출량 저감을 통한 환경보호에 기여할 수 있다.

2. 부하 변동 보상 알고리즘

2.1 싱글 피스톤 압축기의 부하 변동 패턴

압축기의 실린더가 한 개로 구성되어 있는 것과 두 개로 구성 되어 있는 것이 있는데 전자를 싱글 피스톤, 후자를 트윈 피스톤으로 구분한다.

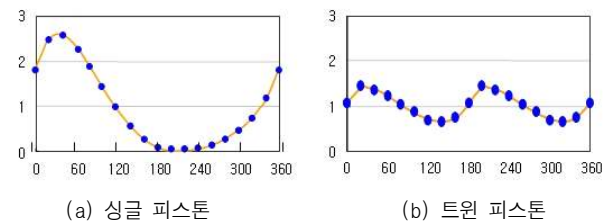


그림 1 부하 토크 패턴
Fig. 1 Patterns of Load Torque

그림 1은 압축기 한 회전 시 각 방식에 대한 기구부의 토크 패턴을 나타내었다. 싱글 피스톤 압축기는 냉매를 압축하는 기구부가 한쪽에만 구성 되어있기 때문에 냉매가 압축되어 토출되기 전까지는 기구부의 부하 토크가 크게 발생하며 토출되고 난 뒤에는 부하 토크가 급격하게 줄어든다. 이러한 부하 변동이 기계각 360도(압축기 1회전당)를 기준으로 주기적으로 반복되어 나타나며, 압축기의 진동, 소음의 근원이 된다. 트윈 피스톤 압축기는 피스톤이 180도씩 대칭으로 구성되어 있으므로 싱글 피스톤 압축기에 비해 부하 변동폭이 작다. 고속 회전 시에는 관성 때문에 진동 문제가 없지만 저속 영역으로 갈수록 기구부의 구조와 부하 토크 때문에 생긴 편심 운동이 심해져 심한 진동으로 나타나고 이 진동으로 인하여 소음이 심

해지고 압축기와 연결된 배관이 파손되는 현상이 발생한다.

1.2 부하 변동 보상 알고리즘

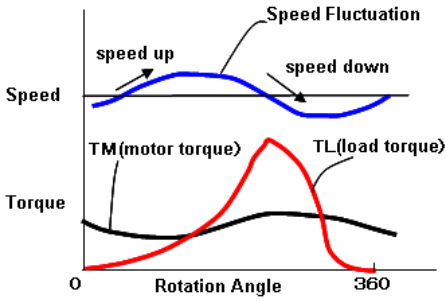


그림 2 부하 토크, 모터 토크 및 속도 맥동
Fig 2. Load torque, motor torque and speed ripple

그림 2.에서는 싱글 피스톤 압축기에서 모터의 발생 토크(Motor Torque)가 부하 토크(Load Torque)를 추종하지 못하여 그 차이에 의해 속도가 흔들리는 것을 나타내었다. 만약 인버터가 모터를 제어할 때 부하토크와 일치하게 모터 토크를 만들어 낸다면 속도 맥동이 줄어들며, 이에 따라 진동 및 소음도 감소하게 될 것이다. 하지만 기존의 속도제어기 만으로는 주기적으로 변하는 부하토크를 추종할 만큼 빠른 응답특성을 기대할 수 없다. 이와 같은 이유로 그림 3.과 같이 부하토크 패턴을 전향제어(Feedforward control) 하는 보상 알고리즘을 개발하였다.

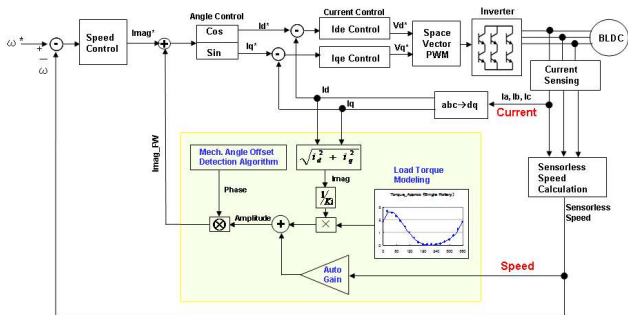


그림 3 부하 토크 보상 알고리즘
Fig. 3 Load torque compensation algorithm

그림 3.은 싱글 피스톤 압축기의 주기적인 부하 변동에 의한 진동을 저감하기 위하여 속도 제어기에서 나오는 전류크기 지령치(Imag*)에 부하토크 보상 패턴(Imag_FW)을 더하여, 압축기 BLDC 모터가 부하패턴과 유사한 토크를 발생시키게 제어한다. 하여, 부하 변동 토크와 모터 발생 토크가 유사하게 됨으로써, 속도 맥동이 작아지며, 압축기의 진동 및 소음이 감소하게 된다.

1.3 부하패턴 크기의 자동이득조절 알고리즘

진동 저감효과를 극대화 하기 위해서는, 부하 패턴이 실제 부하를 잘 모델링 하고 있어야 하며, 부하패턴의 크기(Amplitude) 및 위상(Phase, 모터 회전자 위치와 부하패턴간의 위상)이 일치 하여야 한다. 부하패턴을 전류크기 지령치(Imag*)에 더하여 줄때, 부하 패턴의 크기(Amplitude)를 정해

주어야 한다. 이때 부하 패턴의 크기를 전류의 크기(Imag)로부터 선형적인 함수(1/Kt)로 계산하여 구하고 있으나, 실제 발생하는 모터 토크와 전류크기와는 비선형적인 관계가 있으므로, 패턴의 크기가 실제 부하의 크기와 잘 맞지 않아서 진동저감 효과가 잘 나타나지 않는 문제가 있다. 이 문제를 해결하고자, 부하패턴의 크기를 기존의 선형적인 함수 모델(1/Kt)에서 구해지는 nominal gain값에서 자동으로 크기가 가감되는 auto gain을 더하여 항상 부하패턴의 크기가 실제 부하크기와 일치하도록 자동으로 gain값을 조정하도록 하였다.

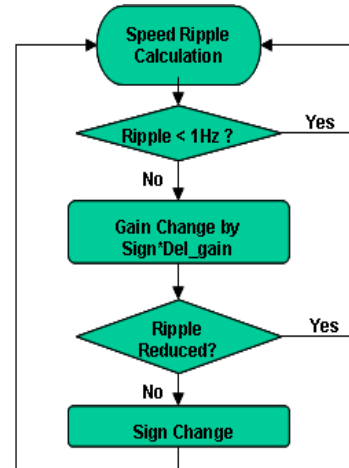


그림4 자동 이득 조절 알고리즘
Fig. 4 Auto gain algorithm

만약 부하 토크와 모터 토크가 일치하지 않으면, 진동이 커지는데 이는 곧 속도 맥동이 증가하는 것과 동일하다는 사실을 이용하여 속도맥동이 최소화 되는 방향으로 auto gain값이 자동으로 바뀌게 하면 항상 진동, 즉 속도 맥동이 최소화 되는 지점에서 압축기가 운전하게 된다. 속도 리플이 최소화 되는 방향으로 보상되는 부하 패턴의 크기가 자동으로 변하므로, 진동저감 효과가 상당히 크며, 부하가 급격하게 변하는 상황에서도 진동 저감효과가 잘 나타난다.

1.4 실험 결과

그림 5.에는 기존 제어방식과 부하변동 보상기술(Torque control)을 적용하였을 경우, 압축기 배관의 진동 변위를 비교 실험한 data이다. 기존 제어방식으로는 20Hz, 15Hz 운전이 불가능 하므로 (부하 변동 및 진동이 심해 센스리스 알고리즘이 발산 함) data를 얻지 못하였다.

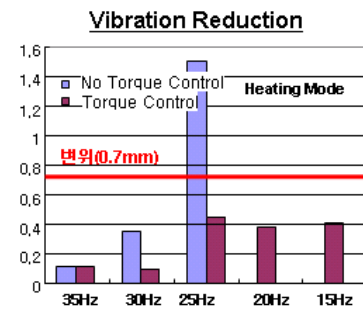


그림 5. 진동 저감 실험 결과
Fig. 5 Vibration reduction experimental result

그림 6.에서는 기존 제어방식과 부하변동 보상기술(Torque control)을 적용하였을 경우 실제 속도 맥동, BLDC의 torque 발생 성분 전류(Iqe)와 모터에 흐르는 상전류를 표시하였다. 부하변동 보상기술을 적용하였을 경우 모터의 발생 torque가 압축기의 부하패턴을 따라 가도록 Iqe전류가 제어되며, 이에 의해 속도 맥동이 0.1Hz내로 감소하는 것을 알 수 있다.

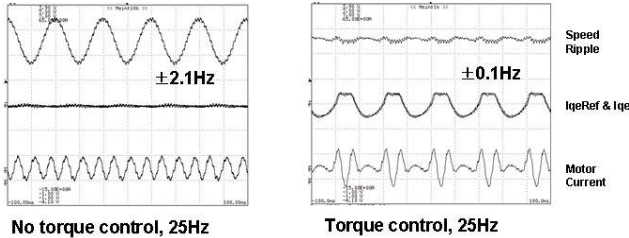


그림 6 진동 저감 실험 파형

Fig. 6 Vibration reduction experimental waveform

3. 결론

본 논문에서는 이제까지 구현하지 못한 싱글 피스톤이 장착된 압축기의 저속 운전의 방법을 제안 하였다. 저속 운전에서도 스피드 리플이 고속에서와 마찬가지로 안정적으로 제어가 가능함으로 속도 제한 없이 압축기를 운전 시킬 수 있고 저속 운전을 실현함으로써 압축기를 정지 시키는 구간이 없고 에너지 소비가 가장 적은 저속으로 연속 운전이 가능하기 때문에 에너지 소비도 감소 시켰다. 그러나 모터가 변하거나 기구적인 부하 토크가 변경된다면 이제까지의 방법으로 새로이 tuning을 해야 하며, tuning에는 시간과 경험적 know-how 가 많이 필요하다. 향후 기구적인 부하 토크 패턴이 변경 되어도 algorithm 내에서 자동으로 부하패턴을 분석하고 gain을 자동으로 설정 할 수 있는 on-line load torque observer 개념의 torque control algorithm의 연구가 필요 하다.

참 고 문 헌

[1] Nobuyuki Matsui, Takaharu Takeshita, "Sensorless Brushless DC Motor Drives Using Current Estimation Error", Nobuyuki Matsui, Nagoya Institute of Technology

[2] S. G. Lee and Y.B. Lim et al., "High Performance speed control of Motor using Load Torque Observer" ,

[3] T. Niwa et al., "Compensation for Parameters Variation of Induction Motor Improved Torque Control Characteristic at Low and High Speed Region" , JIEE Trans, Vol. 122, 1992

[4] H. Kubota et al., "One Control Method of Current Source Inverter Fed Induction Motor Drives with State Observer" , JIEE Trans, Vol. 105, 1985

[5] K. Matsuse and H. Kubota, "Adaptive Flux Observer of Induction 모터 and its Stability" , JIEE Trans, Vol. 111,

1991

[6] K. Ohishi et al., "Robust Control of a DC Servo Motor Based on Linear Adaptive Control System" , JIEE Trans Vol. 108, 1988

[7] M. Iwasaki et al., "High Performance Speed Control System of Vector Controlled Induction with Load Torque Observer", JIEE Vol. 110, 1990