

레시프로 컴프레서의 부하 토크 변동을 반영한 1-Shunt 센서리스 속도 제어 시스템 해석에 관한 연구

한수지, 주창대, 김태규
국립창원대학교

Study of 1-Shunt Sensorless Speed Control System Analysis with Load Torque Variation in Reciprocating Compressors

Suji Han, Chang-Dae Joo, Tae-Kue Kim
Changwon National University

ABSTRACT

본 논문은 레시프로 컴프레서의 부하 토크 변동이 모터 속도와 전류에 미치는 영향을 1-Shunt 센서리스 속도 제어 시뮬레이션을 통해 분석하였다. 피스톤의 왕복 운동에 따른 부하 토크는 주기적으로 변동하며, 이는 모터 속도와 전류에 리플을 유발할 수 있다. 본 연구는 이러한 변동이 실제 구동 환경에서 모터 동작에 미치는 영향을 시뮬레이션을 통해 재현하고 분석하였다. 이를 통해 속도 제어에서 발생할 수 있는 문제를 예측하고, 안정적인 제어 알고리즘 설계를 위한 기초 자료로 활용하고자 한다.

1. 서론

레시프로 컴프레서는 냉동 및 공조 시스템에서 사용되며, 피스톤의 왕복 운동으로 부하 토크가 주기적으로 변동해 모터 속도와 전류에 리플을 유발할 수 있다. 본 논문에서는 1-Shunt 센서리스 속도 제어 시뮬레이션을 통해 실제 구동 환경에서 이러한 부하 토크 변동이 모터에 미칠 수 있는 영향을 분석하였다. 이를 통해 속도 제어의 문제를 예측하고, 안정적인 제어 알고리즘 개발을 위한 기초 자료를 제공한다.

2. 레시프로 컴프레서 부하 토크 변동 특성

2.1 부하 토크 변동의 발생 원인

레시프로 컴프레서는 피스톤이 실린더의 하사점에서 상사점으로 이동하면서 냉매를 압축하고, 이때 실린더 내부의 압력이 높아지며 부하 토크는 증가하게 된다. 이후 피스톤이 상사점에서 하사점으로 다시 이동하면서 냉매를 흡입하고, 흡입 밸브가 열리면서 실린더 내부 압력이 낮아지고 부하 토크가 감소한다. 이 과정이 주기적으로 반복되며 부하 토크의 변동이 나타난다.^[1] Fig. 1은 모터 기계각에 따른 레시프로 컴프레서의 부하 토크 변화를 나타낸다.

2.2 부하 토크 변동이 모터에 미치는 영향

부하 토크가 변동하면 모터의 출력 토크가 변하고, 이에 따라 속도와 전류의 변동이 발생한다. 압축 단계에서는 높은 부하로 인해 속도가 감소하고, 흡입 단계에서는 부하가 줄어 속도가 다시 증가하는 패턴을 보인다. 이로 인해 속도 및 전류에 리플이 발생할 수 있으며, 이는 시스템의 진동 및 소음을 유발

할 수 있다. 이러한 속도 리플은 모터의 제어 정확성을 떨어뜨리며, 센서리스 제어 시 속도 및 위치 추정의 정확성에 영향을 미친다.

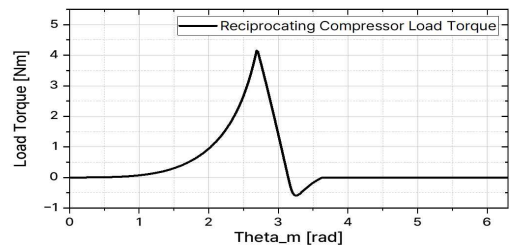


Fig. 1 Reciprocating Compressor Load Torque Characteristics

3. 단일 션트 저항을 이용한 센서리스 제어

3.1 전류 모델 기반 센서리스 제어

센서리스 제어 시 실제의 $d-q$ 축 회전 좌표계를 아는 것이 어렵기 때문에 임의의 $d-q$ 축에 대해 $\gamma-\delta$ 축으로 변환하여 가상의 축 상에서 제어한다.^[2]

두 축이 일치하는 이상적인 상황으로 가정한다. 이를 적용하여 현재의 샘플점 n 에서의 전류값을 차분 방정식으로 나타내면 다음의 식(1)과 같다. 이 때의 T_s 는 샘플링 타임이다.

$$\begin{bmatrix} i_{M\gamma}(n) \\ i_{M\delta}(n) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 - \frac{R_a}{L_d} T_s & \frac{w_M L_q}{L_d} T_s \\ -\frac{w_M L_d}{L_q} T_s & 1 - \frac{R_a}{L_q} T_s \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{\gamma}(n-1) \\ i_{\delta}(n-1) \end{bmatrix} + \frac{T_s}{L_d L_q} \begin{bmatrix} L_q v_{\gamma}(n-1) \\ L_d v_{\delta}(n-1) \end{bmatrix} + \frac{T_s}{L_d L_q} e_M \begin{bmatrix} 0 \\ -L_d \end{bmatrix} \quad (1)$$

직류단의 단일 션트 저항을 이용하여 검출 및 복원된 전류와 이전 샘플점에서 검출한 전압과 전류를 이용하여 계산된 전류의 차는 식 (2)로 나타낼 수 있다.

$$\begin{bmatrix} \Delta i_{\gamma}(n) \\ \Delta i_{\delta}(n) \end{bmatrix} = \frac{T_s}{L_d L_q} \begin{bmatrix} L_q e \sin \Delta \theta \\ L_q (e_M - \cos \Delta \theta) \end{bmatrix} \approx \frac{T_s}{L_d L_q} \begin{bmatrix} L_q e \Delta \theta \\ -L_d \Delta \theta \end{bmatrix} \quad (2)$$

이로부터 추정 역기전력 및 추정 회전자 위치를 식(3)과 식(4)로 계산할 수 있으며, 위치 정보를 샘플링 타임에 대해 미분하여 속도 정보를 얻는다.

$$e_M(n) = e_M(n-1) - K_e \Delta i_\gamma(n) \quad (3)$$

$$\theta(n) = \theta(n-1) + \frac{T_s}{K_E} e_M(n) + K_\theta \Delta i_\gamma(n) \quad (4)$$

식 (3), (4)에서 K_E 는 역기전력 상수, K_e 는 역기전력 추정 이득, K_θ 는 회전자 위치 추정 이득을 의미한다.

추정 속도 정보는 식 (4)의 위치 정보를 샘플링 타임 T_s 에 대해 미분하여 얻을 수 있다.

3.2 직류단 전류 재구성

단일 선트 저항을 이용하여 직류단 전류를 측정하고, 한 PWM 주기에서 두 번의 전류 샘플링을 통해 상전류를 복원한다. $\alpha-\beta$ 축의 전압 레퍼런스 값을 바탕으로 계산된 섹터에 따라 각 상의 주기를 알 수 있으며, 스위치가 OFF 되는 타이밍에서 첫 번째 샘플링된 값은 가장 작은 주기를 갖는 상의 전류 값이 되고, 두 번째 샘플링된 값은 가장 큰 주기를 갖는 상의 전류 값이 된다. 나머지 한 상의 전류 값은 두 상전류 값을 바탕으로 계산된다. 섹터 전환 시 주기가 같거나 그 차이가 매우 작아지면 상전류 복원이 어려워지므로, 게이트 신호의 ON/OFF 주기를 최소 샘플링 시간 만큼 차이가 나도록 딜레이를 적용해야 한다.

4. 시뮬레이션

본 논문에서는 회전자의 기계각에 따른 토크 부하 특성을 MATLAB/Simulink에서 구현하였다. 직류단의 선트 저항을 이용하여 전류를 측정하고, SVPWM 섹터에 따라 상전류를 복원한 후, 좌표 변환된 축 전압과 전류를 바탕으로 회전자 위치 및 속도를 추정하여 속도 제어를 진행하였다. Fig. 2는 본 시뮬레이션 시스템의 블록 다이어그램을 나타낸다.

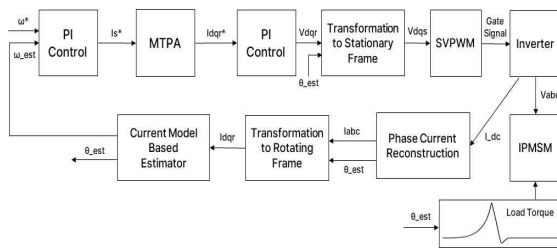


Fig. 2 1-Shunt Sensorless Speed Control Block Diagram

4.1 시뮬레이션 결과 분석

기계각에 따른 부하 토크 변동을 반영한 시뮬레이션 결과, 모터의 속도와 전류는 압축 구간에서 속도가 감소하고, 흡입 구간에서는 속도가 증가하는 것을 확인할 수 있었다. 또한 고속(2500rpm)에서 동작할 때 실제 속도와 추정 속도 간의 오차가 커지는 현상이 드러난다. 이는 고속에서 모터의 상태 변화가 빠르게 일어나면서 발생하게 된다.

Fig. 3과 Fig. 4는 각각 속도 제어 시뮬레이션 결과와 시뮬레이션 부하 토크 파형을 나타낸다. 부하 토크에 따른 상전류 파형도 주기적으로 크기가 변동하는 결과를 보였다. Fig. 5는 부하 토크에 따른 전류 리플 및 상전류 복원 결과를 보여준다.

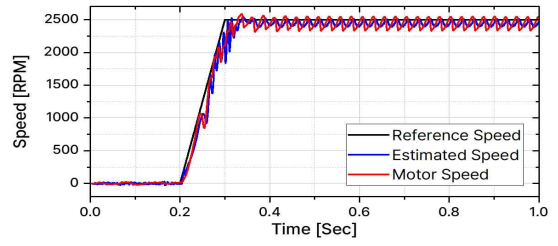


Fig. 3 Results of Sensorless Speed Control Simulation

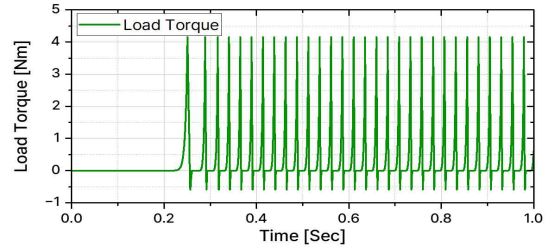


Fig. 4 Results of Load Torque Simulation

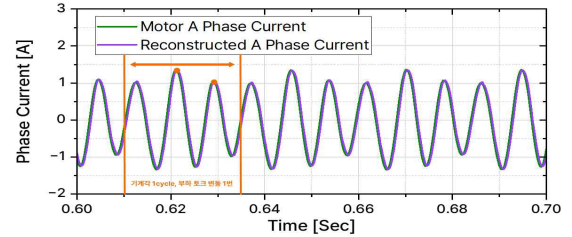


Fig. 5 Results of Current Ripple and Phase Current Restoration

4. 결론

본 논문에서는 레시프로 컴프레서의 부하 토크 변동이 모터 속도와 전류에 미치는 영향을 1-Shunt 센서리스 속도 제어 시뮬레이션을 통해 분석하였다. 이를 통해 부하 토크 변동이 실제 모터 동작에 미치는 영향을 모델링하여 문제 해석의 기초를 마련하였다. 이는 전류 리플로 인해 $d-q$ 축 전류가 MTPA의 경로를 벗어나 모터의 운전 효율이 저하될 수 있음을 시사한다. 이러한 연구를 바탕으로 향후 토크 보상 제어기를 통해 리플을 감소 시키고 효율을 개선하는 데 기여할 수 있을 것으로 기대된다.

본 연구는 2024년도 교육부의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 지자체-대학 협력 기반 지역혁신 사업 (2021 RIS-003) 및 LG전자 연구용역의 수행 결과입니다.

참고 문헌

- [1] Dianov, Anton, "Estimation of the mechanical position of reciprocating compressor for silent stoppage.", IEEE Open Journal of Power Electronics 1, pp. 64-73, 2020
- [2] N. Matsui, T. Takeshita., "Brushless DC Motor Control without Position and Speed Sensors", IEEE Trans. on Industry Application, Vol. 28, No. 1, p. 120, 1992