

압축기 저속 운전 특성 개선을 위한 확장 상태관측기 설계

김정환, 양준혁, 하정익
서울대학교 전기·정보공학부

Design of Extended State Observer to Improve Characteristics of Low-speed Compressor Drive

Jeonghwan Kim, Junhyuk Yang and Jung-Ik Ha

Department of Electrical and Computer Engineering, Seoul National University, Seoul, Korea

ABSTRACT

본 연구는 압축기의 부하 토크의 기본과 성분을 추정하고 보상할 수 있는 확장 상태관측기(Extended State Observer)를 제안한다. 압축기 구동 시 기계각 주기의 부하 토크가 발생한다. 이는 저속 운전 시 속도 맥동이 크게 발생하여 안정적인 제어가 어렵게 된다. 제안한 관측기는 기존 관측기에 상태변수를 확장함으로써 부하 토크를 추종하고 보상할 수 있다. 제안된 방법은 기존 방법대비 속도 맥동을 약 60% 이상 감소시켜 안정적인 제어를 가능하게 함을 확인하였다. 제안한 방법은 압축기 운전 영역의 확장을 통한 효율 증대와 정지 특성 개선 등에 유용하게 활용될 수 있다.

1. 서 론

고효율의 냉장고가 요구되는 추세에 따라 구동 시 효율이 높은 매입형 영구자석 동기전동기(IPMSM)가 많이 사용되고 있다. 또한 인버터를 사용하는 구동 시스템을 통해 기존 on/off 제어 대비 유동적인 속도 제어가 가능하므로 효율을 높일 수 있다^[1].

냉장고에서는 주로 밀폐된 왕복동 압축기(Hermetically sealed reciprocating compressor)가 사용된다. 해당 압축기 구동 시 구조적으로 야기되는 몇 가지 문제점이 존재한다.

첫번째로 높은 내부 압력과 온도로 인해 위치 센서를 사용할 수 없다. 따라서 위치 센서리스 알고리즘을 통해 구동하게 된다.

두번째로 압축기 구동 시 1회전마다 흡입, 토출 행정이 반복되어 기계각 주기의 부하 토크가 발생하게 된다. 이는 고속 운전에서는 관성으로 인해 큰 영향이 없으나 저속 운전에서는 큰 속도 맥동을 야기하게 된다. 이로 인해 진동 발생과 안정적인 제어가 어렵게 된다^[2].

이러한 문제점들로 인해 일반적인 압축기 구동에서는 저속 운전 영역을 회피하여 사용하게 된다. 하지만 부하 토크를 보상하여 안정적인 저속 구동을 가능하게 하면 위치 센서리스가 가능한 운전 영역까지 확장할 수 있다. 이를 통해 효율을 높일 수 있고 정지 특성 개선에도 활용될 수 있다.

따라서 본 논문에서는 압축기 저속 운전 특성 개선을 위해 압축기 부하 토크 보상이 가능한 확장 상태관측기를 제안한다. 실험을 통해 기존 대비 추정 속도 맥동을 약 60% 이상 저감하여 위치 센서리스가 가능한 저속 영역까지 안정적 제어를 가능하게 함을 검증하였다.

2. 본 론

2.1 위치 센서리스 알고리즘

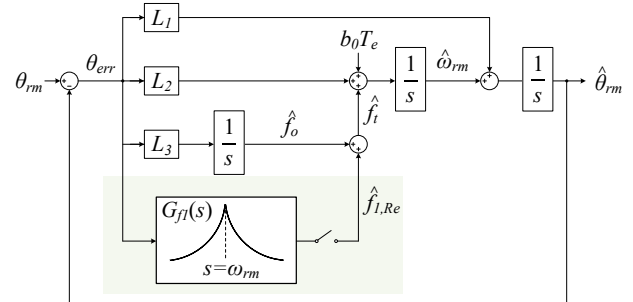


그림1 제안하는 확장 상태관측기.

IPMSM의 전압방정식은 식 (1)과 같다. 이는 확장 역기전력 E_{ex} 을 식 (2)와 같이 정의하게 되면 식 (3)와 같이 표현할 수 있다.

식 (3)을 추정 동기 좌표계에서 표현하게 되면 식 (4)와 같으며 PI state-filter 기반 추정 방법^[3]을 통해 실제 전기각과 추정 전기각의 오차인 $\theta_{r,err}(=\theta_r - \hat{\theta}_r)$ 을 식 (5)와 같이 얻을 수 있다.

$$\begin{bmatrix} v_{ds}^r \\ v_{qs}^r \end{bmatrix} = R_s \begin{bmatrix} i_{ds}^r \\ i_{qs}^r \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} pL_{ds} & -\omega_r L_{qs} \\ -\omega_r L_{ds} & pL_{qs} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{ds}^r \\ i_{qs}^r \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ \omega_r \lambda_f \end{bmatrix} \quad (1)$$

$$E_{ex} = \omega_r [(L_{ds} - L_{qs})i_{ds}^r + \lambda_f] - (L_{ds} - L_{qs})p i_{qs}^r \quad (2)$$

$$\begin{bmatrix} v_{ds}^r \\ v_{qs}^r \end{bmatrix} = R_s \begin{bmatrix} i_{ds}^r \\ i_{qs}^r \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} pL_{ds} & -\omega_r L_{qs} \\ -\omega_r L_{ds} & pL_{qs} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{ds}^r \\ i_{qs}^r \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ E_{ex} \end{bmatrix} \quad (3)$$

$$\begin{bmatrix} \hat{v}_{ds}^r \\ \hat{v}_{qs}^r \end{bmatrix} = R_s \begin{bmatrix} \hat{i}_{ds}^r \\ \hat{i}_{qs}^r \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} p\hat{L}_{ds} & -\hat{\omega}_r \hat{L}_{qs} \\ -\hat{\omega}_r \hat{L}_{ds} & p\hat{L}_{qs} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \hat{i}_{ds}^r \\ \hat{i}_{qs}^r \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \hat{e}_{ds}^r \\ \hat{e}_{qs}^r \end{bmatrix} \quad (4)$$

$$\begin{bmatrix} \hat{e}_{ds}^r \\ \hat{e}_{qs}^r \end{bmatrix} \cong E_{ex} \begin{bmatrix} -\sin \theta_{r,err} \\ \cos \theta_{r,err} \end{bmatrix}, \quad \theta_{r,err} = \tan^{-1} \left(-\frac{\hat{e}_{ds}^r}{\hat{e}_{qs}^r} \right) \quad (5)$$

2.2 기존의 확장 상태관측기 설계

PMSM의 기계방정식은 식 (6)과 같이 정의되며 확장 상태 관측기 설계를 위해 변수를 재정의한다.

식 (7)과 같이 b 는 전동기 관성인 J 의 역수, b_o 는 공칭 관성인 J_o 의 역수, B 는 전동기 마찰 계수, 그리고 f 는 덩어리 외란(Lumped disturbance)을 의미한다. 외란 f 에는 부하 토크, 마찰 계수, 파라미터 불확실성이 포함되므로 파라미터 오차에 대한 강인한 특성을 가지게 된다.

$$\dot{\omega}_{rm} = \frac{1}{J} T_e - \frac{1}{J} T_L - \frac{B}{J} \omega_{rm} = b_o T_e + f \quad (6)$$

$$b_o = 1/J_o, \quad b = 1/J \quad (7)$$

$$f = (b - b_o) T_e - b T_L - b B \omega_{rm}$$

하지만 기존 설계에서의 추정 외란은 관측기의 대역폭에 의존적이며 측정 잡음과 민감도, 센서리스 구동으로 인한 대역폭 증가에 한계가 있으므로 주기적 외란에 대한 추종 성능에는 한계

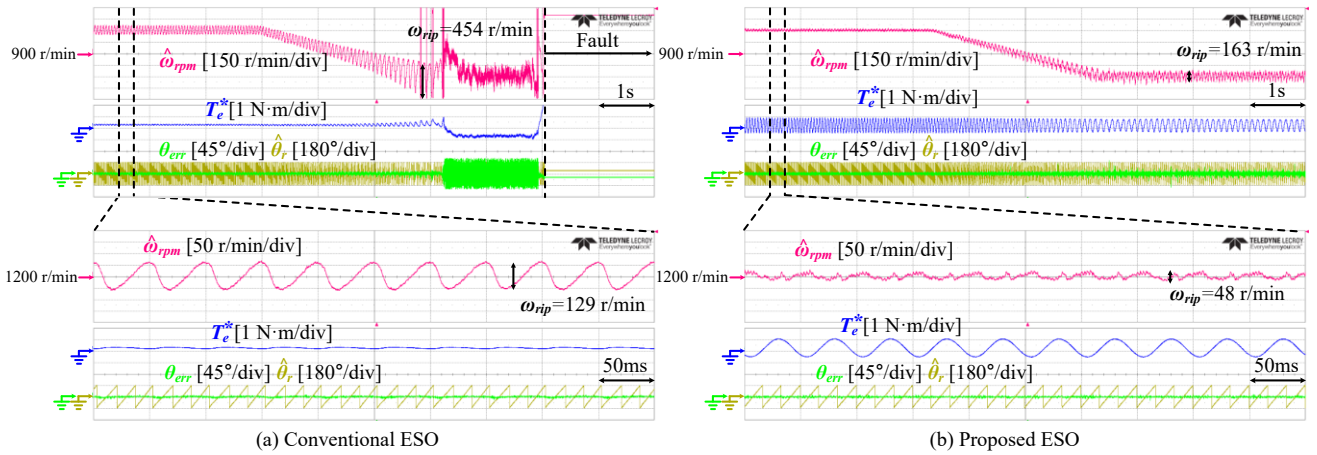


그림4 실험 파형. (a)기존 확장 상태관측기 (b)제안하는 확장 상태관측기

(15)와 같다. 실제 외란 f_t 의 미분인 $\dot{f}_t$ 은 h 로 정의하였다.

$$\begin{bmatrix} \dot{e}_1 \\ \dot{e}_2 \\ \dot{e}_3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -L_1 & 1 & 0 \\ -L_2 & 0 & 1 \\ -L_3 - sG_{f1}(s) & 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} e_1 \\ e_2 \\ e_3 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ h \end{bmatrix} \quad (15)$$

$$[e_1 \ e_2 \ e_3]^T = [\theta_{rm} - \hat{\theta}_{rm} \ \omega_{rm} - \hat{\omega}_{rm} \ f_t - \hat{f}_t]^T$$

식 (15)로부터 실제 외란 f_t 에 대한 추정 외란 $\hat{f}_t$ 의 민감도 함수(Sensitivity function) $S_f(s) (= e_3(s)/f_t(s))$, 실제 속도 ω_{rm} 에 대한 추정 속도 $\hat{\omega}_{rm}$ 의 민감도 함수 $S_\omega(s) (= e_2(s)/\omega_{rm}(s))$ 를 구할 수 있다. 민감도 함수의 이득 $|S_f(s)|, |S_\omega(s)|$ 이 0에 가까울수록 오차 $e_2(s), e_3(s)$ 가 0에 가까우므로 추종 성능을 나타내는 지표로 사용할 수 있다.

그림2에서는 $\omega_o = 30\pi$ [rad/s], $\omega_{rm} = 40\pi$ [rad/s]에서 기존 관측기와 제안안의 외란(a)과 속도(b)에 관한 민감도 함수를 보드선도 상에 도시하였다.

기존 관측기의 $|S_f(s)|, |S_\omega(s)|$ 은 DC에 가까운 주파수 대역일 때는 0에 가까우나 주파수 ω_{rm} 대역에서는 이득이 0에 가깝지 않다. 즉, 해당 주파수 대역에서 외란과 속도의 추종 성능이 떨어지는 것을 나타낸다.

반면 제안안은 해당 주파수 대역에서 notch가 형성되어 $|S_f(s)|, |S_\omega(s)|$ 이 0에 가까운 것을 확인할 수 있다. 이는 기존 확장 상태관측기와 달리 제안안에서는 해당 주파수 대역에서 외란과 속도의 오차는 거의 없음을 나타낸다.

2.5 실험 결과

제안하는 관측기를 검증하기 위해 압축기 구동 실험을 수행하였으며, 전체 제어 블록도는 그림3과 같고, 모터 제정수는 표 1과 같다.

그림4의 위 파형은 감속 기울기는 200 [r/min/s]로 1200 [r/min]에서 600 [r/min]으로 구동하는 파형을 도시한 것이다. 그림4 아래 파형은 1200 [r/min] 정상상태에서의 확대 파형을 도시하였다. 왼쪽 파형(a)에선 비교를 위해 기존 확장 상태관측기를 사용하였고 오른쪽 파형(b)에선 제안하는 확장 상태관측기를 사용하였다.

기존 방법(a)은 부하 토크를 보상하고 있지만 추정 외란 오차로 인해 추정 속도에 기계적 기본과 주기의 맥동이 생기는 것을 확인할 수 있다. 이러한 속도 맥동은 저속일수록 더 커지게 되고 안정적인 제어가 어렵게 된다. (a)위 파형은 이로 인해 추정 각오차 θ_{err} 가 커져 탈조로 이어진 것을 나타낸다.

반면 제안안(b)의 경우 부하 토크의 DC 성분과 기본과 성분을 추정 및 보상하였고 이는 파형(b)에서 토크 지령 T_e^* 를 통해

표 1. 전동기 공칭 제정수.

제정수	값	제정수	값
R_s	5.525 Ω	λ_f	0.209 V/rad/s
L_{ds}	103 mH	J_o	0.00015 kg/m ²
L_{qs}	154 mH	Pole Pair	3

확인할 수 있다. 제안안은 운전 속도 변화에도 on-line으로 부하를 추정, 보상할 수 있음을 파형(b)를 통해 확인할 수 있다.

또한 제안안은 보상을 통해 추정 속도 맥동을 약 60% 이상 저감하여 모델 기반 위치 센서리스가 가능한 저속 영역까지 안정적 제어를 가능하게 함을 검증하였다.

3. 결 론

본 연구는 압축기의 부하 토크의 기본과 성분을 추정 및 보상이 가능한 확장 상태관측기를 제안하였다. 실험을 통해 기존 대비 속도 맥동을 저감하여 저속 구간에서 안정적인 제어가 가능하도록 하였음을 확인하였다. 제안안은 압축기 운전 영역 확장, 정지 특성 개선 등에 유용하게 활용될 수 있다.

이 논문은 서울대학교 전력연구소의 연구비 지원에 의하여 연구되었음

참 고 문 헌

- [1] K. -W. Lee, S. Park and S. Jeong, "A Seamless Transition Control of Sensorless PMSM Compressor Drives for Improving Efficiency Based on a Dual-Mode Operation," in IEEE Transactions on Power Electronics, vol. 30, no. 3, pp. 1446–1456, March 2015.
- [2] S. Wang et al., "Torque Disturbance Compensation Method Based on Adaptive Fourier-Transform for Permanent Magnet Compressor Drives," in IEEE Transactions on Power Electronics, vol. 38, no. 3, pp. 3612–3623, March 2023.
- [3] Hyunbae Kim et al., "Sensorless control of interior permanent-magnet machine drives with zero-phase lag position estimation," in IEEE Transactions on Industry Applications, vol. 39, no. 6, pp. 1726–1733, Nov.–Dec. 2003.