

압축기 속도 리플 저감을 위한 제어기와 관측기 혼합 방법

백현준, 정선미, 김형민, 이학준
삼성전자

A hybrid method of controller and observer for improvement of compressor speed ripple

Hyunjun Baek, Sunmi Jung, Hyeongmin Kim, Hak-Jun Lee
Samsung Electronics

ABSTRACT

본 논문에서는 압축기의 기계 주파수 또는 배수 성분의 주기적 속도 리플을 저감하기 위하여 반복 제어기와 상태 관측기를 혼합하는 방법을 제안한다. 압축기 구동 시 기계각에 동기된 부하 토크가 발생하게 되며, 이는 기본파와 2차 고조파가 결합된 형태로 나타나는 것으로 알려져 있다. 제안된 방법은 속도 리플의 기본파 성분을 외란 관측기를 통해 전향 보상하고, 관측기의 위상 지연과 잔여 차수로 인한 속도 리플 성분을 반복 제어기를 사용함으로써 속도 리플 저감을 확인하였다. 제안된 방법은 압축기 구동 효율 증대 및 저속 운전 영역 확장을 위하여 적용될 수 있다.

$$\begin{aligned} \frac{\omega_r}{\omega_{ref}} &= \frac{2\xi\omega_n + \omega_n^2}{s^2 + 2\xi\omega_n + \omega_n^2} \\ K_p &= 2J\xi\omega_n \\ K_i &= J\omega_n^2 \end{aligned} \quad (1)$$

여기서 ξ , ω_n , K_p , K_i 은 각각 감쇄비, 절점 주파수, 비례 이득, 적분 이득을 의미한다.

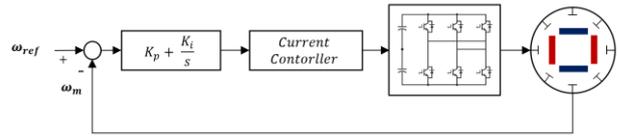


그림 1 전통적인 속도 제어기 블록도
Fig.1 Conventional speed controller block diagram

그림 1에 표현된 전통적인 속도 제어기가 적용된 경우 부하 토크가 직류 성분만을 가지고 있다면 출력 속도는 지령 속도를 추종한다. 그러나 싱글 피스톤을 가지는 압축기의 경우 흡입, 토출 행정이 반복되며 회전 주파수의 2배에 해당하는 교류 성분의 부하 토크가 직류 성분에 더해지게 되어 속도 리플이 발생한다.

2.1 절 외란 관측기^[2]

앞서 언급한 속도 리플 저감을 위해 상태관측기가 적용된 방법이 제안되었다. 이는 회전 주파수의 2배에 해당하는 부하 토크가 발생하는 점에 착안하여, 주기적인 외란을 모델링하여 관측기의 상태변수로 추가하였다. 주기적인 외란은 식(2)와 같이 정의되며, 이를 적용한 관측기는 식(5)와 같다.

$$f_t \equiv a_0 + \sum_{n=1}^{\infty} a_n \cos(n\theta_h + \varphi_n) \quad (2)$$

식(2)를 식(3)과 같이 벡터 형태로 정의할 수 있다.

$$f_n = a_n e^{j(n\theta_h + \varphi_n)} = f_{n,Re} + jf_{n,Im} \quad (3)$$

주기적 외란은 직류 성분인 f_0 와 벡터의 실수부 $f_{n,Re}$ 의 합으로 표현되며, 압축기의 부하 토크는 기본파 성분이 지배적이기 때문에 다음과 같은 식(4)으로 근사 가능하다

$$f_t = f_0 + \sum_{n=1}^{\infty} f_{n,Re} \cong f_0 + f_{1,Re} \quad (4)$$

1. 서론

최근 전동기 구동 시스템은 고효율화 및 소형화 추세에 맞추어 높은 효율과 전력밀도 달성을 위해 IPMSM(매입형 영구자석 동기 전동기) 및 WBG(Wide Band Gap) 전력 반도체를 적용한 다양한 연구들이 진행되고 있다.

이러한 추세는 가전제품 또한 예외가 아니며 세탁기, 건조기가 통합된 일체형 제품의 출시로 이어지고 있다.

가전제품 중 압축기가 적용되는 냉장고, 에어컨과 같은 시스템의 경우 압축기가 소형화, 경량화 됨에 따라 기계적인 진동에 취약해지는 문제가 발생한다.

이는 압축기 회전 1주기에 흡입, 토출 행정이 반복되는 기구적 특성으로 인해 발생하는 부하 토크의 변동에 기인한다. 부하 토크의 변동은 기본파와 2차 고조파가 혼합된 형태로 발생하는 것으로 알려져 있다^[1]. 이는 속도 리플을 발생시키는 원인으로, 저속에서 안정적인 제어가 어려울 뿐 아니라 기구적인 진동을 유발한다.

따라서 본 논문에서는 압축기 기구적 특성으로 인한 속도 리플 저감을 위해 외란 관측기를 통해 부하 토크의 기본파 성분을 보상하고 속도 제어기에 공진 제어기를 추가하여 부하 토크의 잔여 차수를 보상 하는 방법을 제안한다. 제안된 방법은 PLECS를 이용한 모의실험을 통하여 검증하였다.

2. 본론

전통적인 전동기의 속도 제어기는 비례-적분 제어기로 구성되며, 다음 식(1)과 같이 표현된다.

$$\begin{bmatrix} \dot{\hat{\theta}}_r \\ \dot{\hat{\omega}}_r \\ \dot{\hat{f}}_o \\ \dot{\hat{f}}_{Re} \\ \dot{\hat{f}}_{Im} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & -\omega_{rm} \\ 0 & 0 & 0 & \omega_{rm} & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \hat{\theta}_r \\ \hat{\omega}_r \\ \hat{f}_o \\ \hat{f}_{Re} \\ \hat{f}_{Im} \end{bmatrix} + b_0 \begin{bmatrix} 0 \\ T_e \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} L_1 \\ L_2 \\ L_3 \\ L_{f1,Re} \\ L_{f1,Im} \end{bmatrix} \theta_{err} \quad (5)$$

위 관측기의 이득은 다음 식(6) 과 같이 산정하며, 삼중근과 중근을 을 가지는 형태로 설계되었다.

$$\det[sI - (A - LC)] = (s + \omega_0)^3(s^2 + 2k_1s + \omega_f^2) \quad (6)$$

2.2 절 반복 제어기와 외란 관측기 혼합 방식 제안

외란 관측기를 통해 추정된 부하 토크의 기본과 성분을 전향 보상함으로써 속도 리플의 저감이 가능하다. 그러나 실제 부하 토크와 관측된 부하 토크 사이에는 위상 지연이 존재하며, 기본과 외 고차의 부하 토크로 인한 속도 리플이 발생한다.

본 논문에서는 관측기로 인한 위상 지연과 고차의 부하 토크 성분을 제거하기 위해 전통적인 속도 제어기에 반복(Repetitive) 제어기를 추가하는 방법을 제안한다.

반복 제어기의 개루프 전달함수는 다음 식(7) 같이 구성된다. 여기서 K_r 은 반복 제어기의 이득이다.

$$R(s) = \frac{K_r e^{-sT}}{1 - e^{-sT}} \quad (7)$$

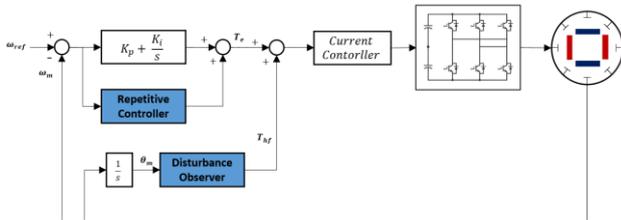


그림 2 제안하는 방법의 블록도
Fig.2 Block diagram of proposed method

2.3 절 모의 실험

그림 2는 제안하는 방법을 나타낸 블록도이다. 주기적인 외란의 기본과 성분은 외란 관측기를 통해 전향 보상하며, 관측기 지연과 잔여 차수의 외란 토크는 속도 제어기에 반복 제어기를 추가함으로써 보상이었다. 제안된 방법의 성능은 PLECS를 이용한 모의 실험을 통하여 검증하였다.

운전 속도는 600rpm 정속 운전 조건이며, 주기적인 외란의 모사를 위해 크기가 0.5Nm, 주파수가 20hz인 정현파와 크기가 0.25Nm, 주파수가 40hz인 정현파가 합성된 외란 토크를 입력하였다. 속도 제어기의 절점 주파수는 20hz, 전류 제어기의 절점 주파수는 100hz로 설정하였다. 모의 실험에 사용된 전동기 제정수 값은 표 1과 같다.

표 1 모의실험 적용 전동기 제정수
Table 1 Motor parameter for simulation

상저항	5.4
D축 인덕턴스	0.074
Q축 인덕턴스	0.102
영구자석 자속	0.171
관성 모멘트	0.0001
극쌍수	5

0에서 2초 사이에는 전통적인 속도 제어기만을 사용하였고, 2에서 4초 사이에는 외란 관측기를 통해 외란 토크의 기본과 성분을 전향 보상하였고, 4초 이후는 외란 관측기와 반복 제어기를 적용하였다.

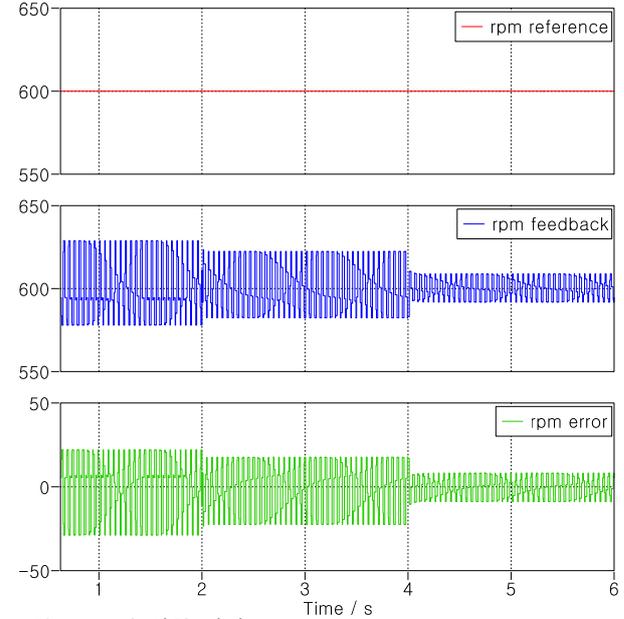


그림 3. 모의 실험 결과
Fig.3 simulation result

전통적인 속도 제어기를 사용하였을 경우 속도 리플은 50rpm, 외란 관측기를 추가한 경우에는 39rpm, 외란 관측기와 반복 제어기를 적용한 경우에는 16rpm으로 제안된 방법을 적용한 경우 전통적인 방법 대비 약 60% 속도 리플 저감이 가능함을 검증하였다.

3. 결론

본 논문에서는 압축기의 속도 리플 저감을 위해 반복 제어기와 외란 관측기의 혼합을 제안하였다. 이후 PLECS를 이용한 모의 실험을 통해 효과를 검증하였다. 제안된 방법은 압축기의 속도 리플 저감을 통한 운전 영역 확장 등에 적용 될 수 있다.

참고 문헌

- [1] 임선경, 임준영 and 박태영, "부하 토크 보상을 통한 에어컨용 Single Rotary Compressor의 저진동 저속제어," in 전력전자학회 학술대회 논문집, pp. 334-336, 2010.
- [2] 김정환, 양준혁 and 하정익, "압축기 저속 운전 특성 개선을 위한 확장 상태관측기 설계," in 전력전자학회 학술대회 논문집, pp. 252-254, 2023.