

외란상쇄관측기의 부하 변동 제어 특성

송호빈*, 조문택**, 백동현***, 김영춘****, 김옥환****, 문석환****, 박동수*****
 *(주)휴스컴, **대원대학, ***경원대학교, ****공주대학교,
 *****제주한라대학, *****노보시스
 e-mail:songhobin@paran.com

Load Variation Control Characteristics of Disturbance Cancellation Observer

Ho-Bin Song*, Moon-Taek Cho**, Dong-Hyun Back***,
 Young-Chun Kim****, Ok-Hwan Kim****, Suk-Hwan Moon*****, Dong-Su
 Park*****
 *HUSCOM CO, **DaeWon Univ. College, ***KyungWon Univ.,
 ****KongJu National Univ., *****CheJu HalLa College, *****NOVOSYS

요약

본 논문에서는 부하변동에 대해 강인한 제어를 구현하기 위해 PI제어기에 feedforward 외란상쇄관측기를 부가하여 구현하였다. 이로 인해 외란 변동 등의 상황에서 보다 안정적인 동작을 할 수 있도록 제안하였다. 이를 입증하기 위하여 Matlab으로 시스템의 안정도에 대해 시뮬레이션을 수행하였고, 5[Hp] 유도전동기에 대해 실험을 수행하여 제안한 시스템의 유용성을 확인하여 보았다.

1. 서론

유도전동기의 제어에서 PI제어기의 경우 구현이 쉽고 간단하며 제어기 이득을 적절히 조절함으로써 최적의 운전상태를 얻을 수 있다. 그러나 PI제어는 부하외란이나 파라미터 변동에 매우 민감하기 때문에 운전범위에 제한을 받는다. 또한, PI제어는 출력측에 외란의 영향이 나타나고, 이 외란을 보상하는 시간이 많이 걸리게 된다. 따라서 일반적으로 외란이 있는 경우에 내부모델을 기초로 하여 출력에서 외란의 영향이 나타나지 않는 외란상쇄를 고려할 필요가 있다고 생각된다. 서보 제어에서는 제어대상의 출력에 스텝상태 또는 램프상태로 하는 목표치가 주어지며, 또한 스텝상태의 외란이 제어대상의 입력측에 가해지는 경우가 있다.[1][2]

PI제어기만으로도 정속도 운전 등의 환경에서는 양호한 동작 특성을 나타내지만 외란이 유입되거나 부하토크가 가변 될 경우에는 PI제어기만으로는 안정된 동작 특성을 얻는 것이 힘들게 되어 부가적인 제어기가 필요하게 된다.

이에 본 논문에서는 부하토크를 외란 요소로 간주하여 부하토크 가변시에도 양호한 동작 특성을 얻고자 한다. 최소차원 관측기를 이용하여 부하토크를 추정하고, 추정된 부하토크를 feedforward 루프를

통해 상쇄시켜주는 외란상쇄 제어기를 구성하여 외란변동 등의 상황에서도 보다 안정적인 동작을 할 수 있도록 하였다.[3]

이와 같은 이론을 입증하기 위하여 기존의 PI제어기에 의한 방법과 외란상쇄 관측기를 부가한 시스템의 특성을 시뮬레이션과 실험을 통해 비교, 분석하여 제안된 시스템의 유용성을 확인하였다.

2. 제어기

2.1 외란상쇄 관측기

본 논문에서는 3.1절에서 알아본 최소차원 관측기를 이용하여 유도전동기의 외부에서 인가되는 미지의 부하토크를 추정하고, 이 추정 값을 이용하여 외란상쇄 관측기를 구성하고자 한다. 즉, 외란 r 은 측정이 불가능하므로 최소차원 관측기를 이용하여 추정하고자 한다. 유도전동기의 상태방정식과 출력방정식에서 측정 가능한 상태변수 x 와 측정 불가능한 상태변수인 외란 r 로 나누어 정리하면 상태방정식과 출력방정식은 식 (1)과 같이 다시 쓸 수 있다.

$$\begin{bmatrix} \dot{x} \\ \dot{r} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} A_{11} & A_{12} \\ A_{21} & A_{22} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x \\ r \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} B_1 \\ B_2 \end{bmatrix} i_T \quad (1)$$

$$Y = \begin{bmatrix} 1 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x \\ r \end{bmatrix} = x$$

여기서, r 은 외란이다.

이것을 최소차원 관측기를 사용하여 외란모델의 상태량을 추정한다. 즉, 측정할 수 있는 변수와 측정할 수 없는 변수를 구분하여 재구성하여, 외란상쇄를 위한 설계파라미터 행렬을 L 이라 두면 외란상쇄 관측기 방정식은 다음과 같이 된다.[4]

$$z = r - Lx = r - LY \tag{2}$$

$$\dot{z} = \hat{A}z + \hat{H}Y + \hat{B}u \tag{3}$$

여기서,

$$z = \begin{bmatrix} z \\ \dot{z} \end{bmatrix}, \quad \hat{A} = A_{22} - LA_{12}, \quad \hat{H} = \hat{A}L + A_{21} - LA_{11}$$

$$\hat{B} = B_2 - LB_1, \quad r: \text{외란}, \quad L: \text{외란상쇄 파라미터 행렬}$$

따라서, 외란상쇄 관측기에 대한 수식은 식 (3)으로부터 식 (4)와 같이 정의된다.

$$\dot{\hat{z}} = \hat{A}\hat{z} + \hat{H}Y + \hat{B}u \tag{4}$$

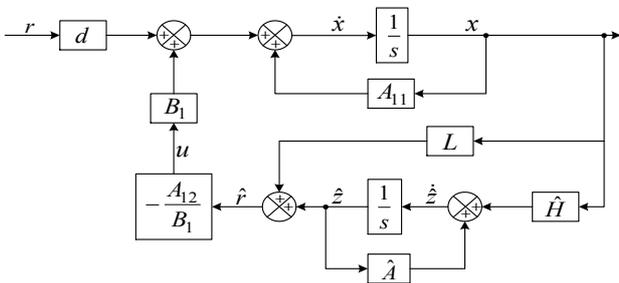
그리고, 추정된 외란의 양은 식 (2)를 r 에 대해 정리하여 나타낼 수 있으며 추정식은 다음과 같다.

$$\hat{r} = \hat{z} + LY \tag{5}$$

따라서, 외란 r 에 대한 상태방정식인 식 (1)에 외란상쇄 관측기 식 (4)를 결합한 상태방정식은 정상상태에서는 식 (6)과 같다.

$$\frac{d}{dt} \begin{bmatrix} x \\ \hat{z} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} A_{11} + A_{12}L & A_{12} \\ \hat{H} & \hat{A} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x \\ \hat{z} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} B_1 \\ 0 \end{bmatrix} u \tag{6}$$

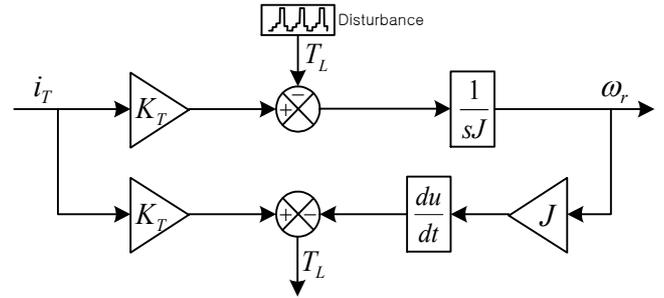
위의 식 (6)을 블록도로 나타내면 [그림 1]과 같다.



[그림 1] 외란상쇄 관측기 블록도

2.2 Feedforward 외란상쇄 관측기 설계

압연기 등의 속도 및 위치제어를 발생하는 모션의 분야에서는 대부분의 경우에 지배적인 외란요소는 토크외란이다. 이 외란을 추정할 때는 그것을 forward-back하여 상쇄가 가능하게 되며 외란상쇄 제어를 행할 수 있다. 따라서, [그림 2]에 나타낸 시스템 블록도에서 부하의 외란토크 T_L 을 입력전류 i_T 와 각속도 ω_r 에서 추정하는 것을 고려한다.[5]



[그림 2] 외란토크 추정

그리고 K_T 는 토크상수, J 는 전동기의 관성 모멘트, ω_r 은 축의 각속도를 나타내고, 이때 시스템에 대한 운동방정식을 T_L 에 대하여 나타내면 식 (7)과 같이 된다.

$$T_L = K_T i_T - J \frac{d\omega_r}{dt} \tag{7}$$

식에서 보는 바와 같이 입력전류와 각속도의 미분값을 이용하면 T_L 을 계산하여 구할 수 있다.

그러나, 이 방법도 각속도의 미분이 필요하기 때문에 그 실현은 어렵고, 만약 가정이 가능하다고 하여도 고주파에서 고 이득으로 되기 때문에 추정치에 관측 노이즈의 영향이 크게 나타난다. 왜냐하면, 약간의 오차만 생겨도 출력에는 그 값의 미분이 발생하므로 엄청난 변동치가 발생하게 된다.

따라서, 앞 절에서 설명한 외란 관측기 수식을 사용하여 정리하면

$$\dot{\hat{z}} = \frac{L}{J}\hat{z} + \frac{L^2}{J}\omega_m - \frac{L}{J}K_t i_T \tag{8}$$

$$\hat{T}_L = \hat{z} + L\omega_r \tag{9}$$

위 식 (8)을 \hat{z} 에 대하여 정리하여 식 (9)에 대입

하여 풀면 다음과 같다.

$$\begin{aligned} \hat{T}_L &= \frac{1}{Js-1} (L^2\omega_r - LK_t i_T) + L\omega_r \\ &= \frac{L}{Js-L} (Js\omega_r - K_t i_T) \\ &= \frac{1}{1+\tau_o s} T_L \end{aligned} \quad (10)$$

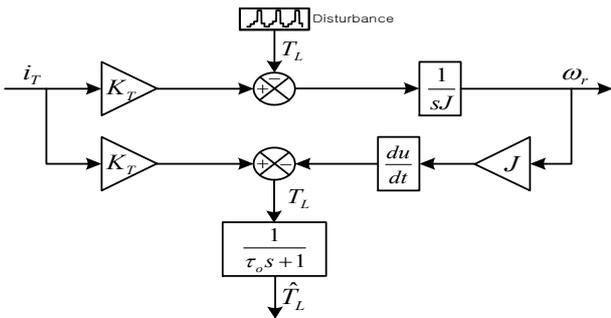
여기서, $\tau_o = -\frac{J}{L}$ 이다.

이것은 관측기 수식이 다음과 같이 Low-pass Filter를 통한 형태로 해석이 된다.

$$\hat{T}_L = \frac{1}{\tau_o s + 1} T_L \quad (11)$$

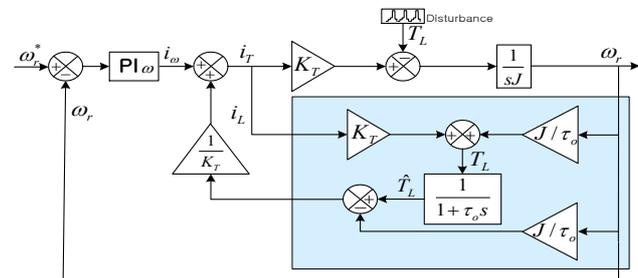
따라서, 식 (11)로 나타낸 것과 같이 Low-pass Filter를 통하여 얻은 출력 \hat{T}_L 를 부하토크에 대한 추종 값으로 보면 된다.

[그림 1]에 식 (11)을 결합하여 Low-pass Filter를 통한 외란토크 추정기의 블록도를 나타내면 [그림 3]과 같다.



[그림 3] Low-pass Filter를 통한 외란토크 추정

그러나, ω_r 에서 \hat{T}_L 까지의 전달함수가 식 (12)와 같이 미분인자를 사용하지 않은 형태로 될 수 있다.



[그림 4] 외란 관측기와 외란상쇄제어 블록도

$$-\frac{Js}{\tau_o s + 1} = -\frac{J}{\tau_o} \left(1 - \frac{1}{\tau_o s + 1}\right) \quad (12)$$

위 식에 대한 블록도는 [그림 4]과 같이 외란 관측기를 이용한 외란상쇄제어로 나타나게 된다.

여기서, 외란 관측기의 극은 식 (11)의 Low-pass Filter의 극에 상당하기 때문에 Filter의 시정수를 가능한 작게 잡아서 지연이 작은 추정치를 얻을 수 있다.[34]

3. 시뮬레이션 및 실험

본 논문에서 제안한 feedforward 외란상쇄 관측기 시스템의 안정도에 대해 알아보기 위하여 시뮬레이션과 실험을 수행하였으며, 이에 사용한 유도전동기의 파라미터는 [표 1]과 같다.

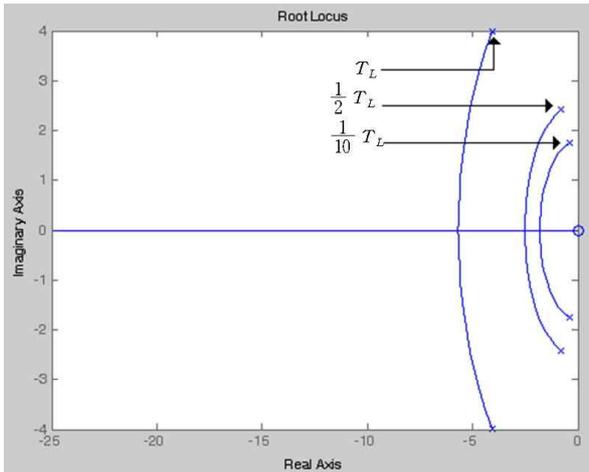
[표 1] 유도전동기 파라미터

항 목	기 호	값
정 격 출 력	kW	3.7[kW]
정 격 전 압	V	220[V]
정 격 전 류	I	12.9[A]
정 격 속 도	ω_r	1720[rpm]
극 수	P	4극
고정자 저항	R_s	0.9210[Ω]
회전자 저항	R_r	0.5830[Ω]
고정자 인덕턴스	L_s	0.0671[H]
회전자 인덕턴스	L_r	0.0671[H]
상호 인덕턴스	L_m	0.0650[H]
관성 모멘트	J	0.0418[kg · m ²]
마찰 계 수	B	0.0045[kg · m ² /s]

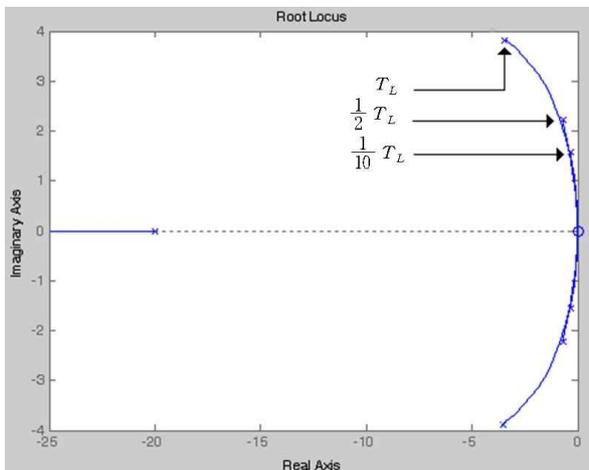
부하토크가 변동할 때 PI제어기와 feedforward 외란상쇄 관측기의 시스템에 대한 근궤적을 이용하여 안정도를 비교하였다.

[그림 5]와 [그림 6]은 전부하, 전부하의 반, 전부하의 0.1배로 각각 인가하였을 경우의 근궤적도가 된다. 모든 근궤적은 s-평면상의 좌반부에 존재하므로 안정하다고 볼 수 있다. 그러나 관측기의 극점은 가능한 관측기 극점을 멀리 위치시켜야 하고, 우세 극점에 영향을 미치는 관측기 극점은 출력의 진동을 줄이기 위해서 반드시 실수축에 가깝게 배치되어야 한다. [그림 6]에 나타난 feedforward 외란상쇄 관측기의 근궤적이 [그림 5]의 PI제어기 근궤적

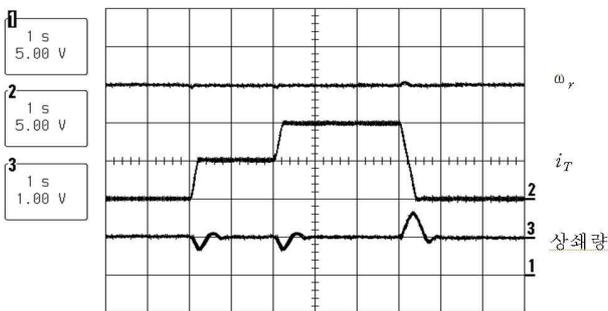
에 비해 이와 같은 조건을 보다 더 만족하고 있음을 알 수 있으므로 PI제어기에 외란상쇄 관측기를 부가함으로써 보다 안정된 제어를 구성할 수 있음을 알 수 있다.



[그림 5] PI제어기의 외란억압에 대한 근궤적



[그림 6] Feedforward외란상쇄 관측기의 외란억압에 대한 근궤적



[그림 7] Feedforward 외란상쇄 관측기의 상쇄량
(speed : 100[rpm], Load : 0→반부하→전부하→0)

1Ch : 400[rpm]/div., 2Ch:5[A]/div., 3Ch:1[A]/div., Time:1[sec]/div.

[그림 7]은 PI제어기에 feedforward 외란상쇄 관측기를 부가하여 운전하였을 경우의 속도와 부하전

류 i_T 그리고 외란상쇄 제어기에 의해 상쇄되는 양을 나타내고 있다. 그림에서 보는바와 같이 외란상쇄 제어기에 의해 부하전류 i_T 의 진동을 상쇄된 양만큼 상쇄해 줌으로서 속도의 변동을 억제해 주는 것을 알 수 있다.

4. 결 론

본 논문에서는 부하외란 변동에 강인한 속도제어기를 구현하기 위하여 부하토크 외란 관측기를 적용한 feedforward 외란상쇄 관측기를 제안하였고, 5[Hp] 유도전동기 시스템에 적용하여 시뮬레이션 및 실험을 통해 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

- [1] 부하외란에 의한 영향을 검토한 결과 기존의 PI제어기에 비해 feedforward 외란상쇄 관측기를 사용하였을 때 부하외란을 상쇄시켜 더욱 더 속도 변동이 억제되었다.
- [2] 부하토크 관측기에 있는 미분항이 없는 형태로 구성하여 feed-forward 함으로서 토크 변동과 속도의 변동을 억제할 수 있었다.
- [3] 전통적인 제어기와 종래의 최소차원 관측기보다 제어기 설계가 간단하게 이루어짐을 확인하였다.

참고문헌

- [1] Stephan Kuhne and Ulrich Riefenstahl, "A new torque calculation motor drives that improves accuracy and dynamic behaviour", ISIE'99-Bled Solvenia, pp.498-503, 1999.
- [2] Hisao Kubota, Kouki Matsuse and Takayoshi Nakano, " Field oriented induction motor drives without speed sensor based on adaptive flux observer and disturbance torque compensation", IECON'91, pp.1855-1860, 1991.
- [3] Chee-Mun Ong, "Dynamic simulation of electric machinery", Prentice Hall PTR, 1998.
- [4] N. Kenzo and N. Hidekazu and H. Mitsuo, "Matlab을 이용한 制御系設計", 東京電氣大學出版局, pp 87~102, 1998
- [5] A. Monti, F. Pironi and F. Sartogo, "A new state observer for sensorless DTC control", IEEE, Power Electronics and variable Speed Drives, NO. 456, pp.311-317, 1998.