

외란상쇄 관측기를 적용한 유도전동기 정속도 운전

김용주, 서영수
명지대학교

Driving Constant Speed of Induction Motor using Disturbance Cancellation Observer

Yong-ju Kim , Young-soo Seo
Myongji University

ABSTRACT

This paper described a robust control of an induction motor using a disturbance cancellation observer of a feedforward control. The speed response of conventional PI controller characteristic is affected by variations of load torque disturbance. In the proposed system, the speed control characteristic using a feedforward control isn't affected by a load torque disturbance.

본 논문에서는 외란의 변화에 대하여 외란상쇄 피드포워드 루프제어를 적용한 유도전동기의 벡터제어를 고려하였다. 제안한 시스템에서 부하토크는 유도전동기의 토크를 최소화원 상태관측기를 근거로 하여 추정한다. 상태관측기를 사용한 속도제어기는 토크에 대한 피드포워드 루프를 조건으로 하여 사용할 수 있으므로 강인한 속도제어 시스템을 실현할 수 있다.

1. 서 론

최근 벡터제어이론을 적용한 유도전동기 운전시스템이 산업현장에 널리 보급되고 있으며 유도전동기 구동기술의 발전에 의해 그 적용분야 또한 다양화되고 있다.⁽¹⁾⁽²⁾⁽³⁾ 또한, 압착기나 컴프레셔와 같은 운전에서 정속도를 유지하는 것은 매우 중요하게 여겨진다. 따라서 이러한 요구에 대한 제어기의 특성은 외란의 변화와 시스템 파라미터의 변화에 대비하여 강인한 제어를 필요로 한다.

전통적인 속도제어기의 경우 지령속도에 대한 속도응답과 외란에 대한 응답 특성 방정식들은 실제의 파라미터에 관련되고, 파라미터의 변화는 시스템의 극 위치를 변화시키게 되어, 이상적인 속도응답과 다른 응답을 나타내게 된다.⁽²⁾ PI 제어기의 경우 구현이 쉽고 간단하며 제어기 이득을 적절히 조절함으로써 최적의 운전상태를 얻을 수 있다.⁽²⁾ 그러나 PI제어는 부하 외란이나 파라미터 변동에 매우 민감하기 때문에 운전범위에 제한을 받는다.

따라서 일반적으로 외란이 있는 경우에 내부모델 원리를 기초로 하여 출력에서 외란의 영향이 나타나지 않는 외란상쇄를 고려할 필요가 있다고 생각된다. 서보제어에서는 제어대상의 출력에 스텝상태로 하는 목표치가 주어지며, 또한 스텝상태의 외란이 제어대상의 입력 측에해지는 경우가 있다.⁽¹⁾

2. 본 론

2.1 유도전동기 모델링

유도전동기를 상태변수의 전류와 속도에 대한 상태방정식으로 나타내면 식 (1)과 같다.

$$p \begin{bmatrix} i_{dq} \\ \omega_r \end{bmatrix} = A_K \begin{bmatrix} M_{11} & M_{12} \\ M_{21} & M_{22} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{dq} \\ \omega_r \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} L_1 \\ L_2 \end{bmatrix} v \quad (1)$$

여기서

$$i_{dq} = [i_{ds} \ i_{qs} \ i_{dr} \ i_{qr}]^T, \quad A_K = -\frac{1}{L_s L_r - L_m^2}$$

$$M_{11} = \begin{bmatrix} R_s L_r & -\omega_r L_m^2 & -R_r L_m & -L_r L_m \omega_r \\ \omega_r L_m^2 & R_s L_r & L_r L_m \omega_r & -R_r L_m \\ -R_s L_m & L_s L_m \omega_r & R_r L_s & L_s L_r \omega_r \\ -L_s L_m \omega_r & -R_s L_m & -L_s L_r \omega_r & R_r L_s \end{bmatrix}$$

$$M_{12} = [0 \ 0 \ 0 \ 0]^T, \quad M_{21} = [0 \ 0 \ 0 \ 0]$$

$$M_{22} = -\frac{P}{2J}$$

$$L_1 = [L_r \ L_r \ -L_m \ -L_m]^T, \quad L_2 = 0$$

이다.

또한, 전동기의 벡터제어를 위해서는 자속의 회전각과 크기를 알아야 한다. 이를 위해 본 논문에서는 간접벡터 제어 방법을 사용하여 제어시스템을 구현하였다.

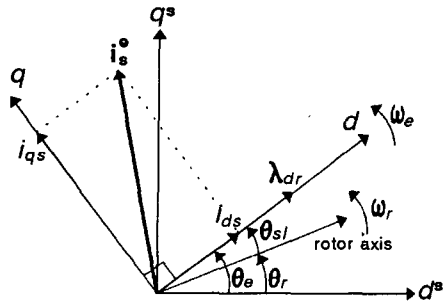


그림 1 회전자 쇄교자속 및 고정자 전류의 벡터도
Fig. 1 Vector diagram of state current and rotor flux

그림 1에서 고정자의 d^s축을 기준으로 한 d축의 회전각 θ_e 는

$$\theta_e = \theta_r + \theta_{sl} \quad (2)$$

의 관계가 있으므로, θ_r 은 전동기로부터 측정하고 θ_{sl} 은 전동기 상수를 이용하여 계산하면 θ_e 를 얻을 수 있다. 그리고, 유도전동기의 모델링에 의한 방정식을 이용하여 슬립각속도를 계산하면 식 (3)과 같다.

$$\omega_{sl} = \frac{1}{\tau_r} \frac{i_{qs}}{i_{ds}} \quad (3)$$

식(3)을 이용하면 자속의 회전각 θ_e 는 다음과 같고,

$$\theta_e = \int_0^t \omega_e dt = \int_0^t (\omega_r + \omega_{sl}) dt \quad (4)$$

그리고, 전동기의 발생토크는 식 (5)와 같다.

$$T = \frac{3}{2} \frac{P}{2} \frac{L_m^2}{L_r} i_{ds} i_{qs} \quad (5)$$

2.2 전통적인 속도 제어기의 문제점

벡터제어 유도전동기의 기계적인 방정식은 토크 성분을 기본으로 식 (6)에 주어지는 것과 같다.

$$J \frac{d\omega_m}{dt} + T_L = K_T i_T \quad (6)$$

여기서, K_T 는 토크상수, J 는 전동기 관성모멘트, ω 는 축 각속도를 나타내고, 이때의 식 (6)을 기본으로 속도 제어기 $G_c(s)$ 를 사용한 전통적인 속도제어 블록선도는 그림 2와 같다. 그림 2에서 보는 것과 같이 지령속도 ω_m^* 에 대한 속도 응답 특성은 식 (7)과 같다.

$$\frac{\omega_m}{\omega_m^*} = \frac{K_T G_c(s)}{sJ + K_T G_c(s)} \quad (7)$$

그리고 외란에 대한 응답특성은 식 (8)과 같다.

$T_L=0$ 와 같은 이상적인 조건에서의 속도응답은 식 (8)의 제어기 $G_c(s)$ 에 의해 설계되어 질 것이다.

$$\frac{\omega_m}{T_L} = -\frac{1}{sJ + K_T G_c(s)} \quad (8)$$

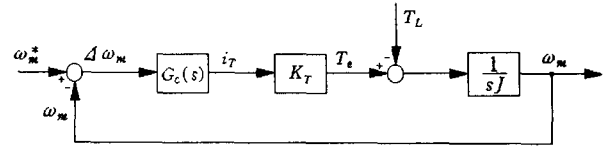


그림 2 속도 제어기 블록선도
Fig. 2 Speed controller block diagram

그러나 지령속도에 대한 속도응답과 외란에 대한 응답 특성 방정식은 실제의 파라미터 J 와 K_T 에 관련되고, 파라미터의 변화는 시스템의 극 위치를 변화시키게 되며, 따라서 이상적인 속도 응답과 전혀 다른 응답을 나타내게 된다. 또한 속도지령에 대한 속도응답과 외란의 제응답은 개별적으로 설계할 수 없게 된다. 왜냐하면 속도응답은 천천히 제한 될 것이지만, 반면에 외란억제는 빠르게 기대치에 도달하기 때문이다.⁽¹⁾⁽³⁾ 그러므로, 실제의 경우에는 알려지지 않은 외란 T_L 이 존재하고, 위와 같은 조건에서는 최적의 응답을 얻을 수 없게 된다.

2.3 외란 관측기 설계

2.3.1 외란 상쇄제어

유도전동기의 시스템 방정식 x 와 외란의 방정식 r 을 이용하여 식 (9)와 같은 상태 방정식을 얻을 수 있다.

$$\dot{X} = AX + Bu \quad (9)$$

여기서

$$X = \begin{bmatrix} x \\ r \end{bmatrix}, \quad A = \begin{bmatrix} A_{11} & A_{12} \\ A_{21} & A_{22} \end{bmatrix}, \quad B = \begin{bmatrix} B_1 \\ B_2 \end{bmatrix}$$

$$u = i_T$$

이것을 최소차원 관측기를 사용하여 외란모델의 상태량을 추정한다. 설계파라미터 행렬을 L 이라 두면 외란 추정기 방정식은 다음과 같이 된다.

$$\dot{z} = \widehat{A} z + \widehat{H} Y + \widehat{B} u \quad (10)$$

$$z = \begin{bmatrix} z \\ \dot{z} \end{bmatrix}, \quad \widehat{A} = A_{22} - LA_{12}, \quad \widehat{B} = -LB_1$$

$$\widehat{H} = \widehat{A} L + A_{12} - LA_{11}$$

외란 추정량은 다음과 같이 나타내고,

$$\widehat{r} = z + LY, \quad \widehat{r} = \begin{bmatrix} \widehat{r} \\ \widehat{r} \end{bmatrix}$$

$$u = -\frac{A_{12}}{B_1} \widehat{\omega} = -\frac{A_{12}}{B_1} (z + Lx)$$

그리고, 관측기를 결합한 상태방정식은 다음 식과 같다.

$$\frac{d}{dt} \begin{bmatrix} x \\ z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} A_{11} - A_{12}L & -A_{12} \\ H & A_{22} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x \\ z \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} A_{12} \\ 0 \end{bmatrix} r \quad (11)$$

$$H = \hat{H} + L^2 A_{12}$$

식 (11)을 블록선도로 나타내면 그림 3과 같다.

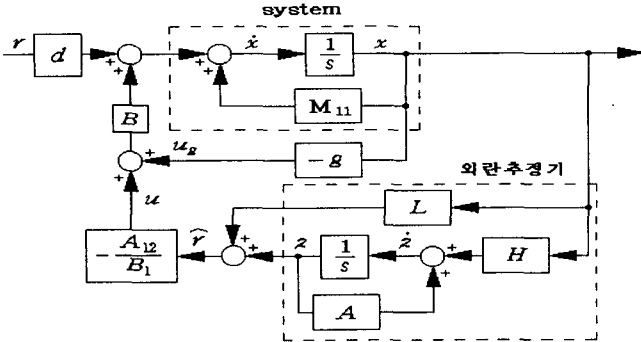


그림 3 외란 상쇄제어계 블록선도
Fig. 3 Disturbance cancellation block diagram

2.3.2 Feedforward 외란 관측기 설계

압연기 등의 속도 및 위치 결정제어를 발생하는 모션의 분야에서는 대부분의 경우에 지배적인 외란은 토크 외란이다. 이 토크외란을 추정할 때는 그것을 forward-back하여 상쇄가 가능하게 되며 외란억제 제어를 행할 수 있다. 따라서 그림 2에 나타낸 전동기의 블록선도를 예를 들어 부하의 외란토크 T_L 을 입력전류 i_T 와 각속도 ω 에서 추정하는 것을 고려한다. 시스템에 대한 운동방정식 (6)을 T_L 에 대하여 나타내면 식 (12)와 같이 된다.

$$T_L = K_T i_T - J \frac{d\omega_m}{dt} \quad (12)$$

여기서, 입력전류와 각속도의 미분값에서 T_L 을 계산하여 구할 수 있다. 이 식 (12)를 블록선도로 나타낸 것이 그림 4이다.

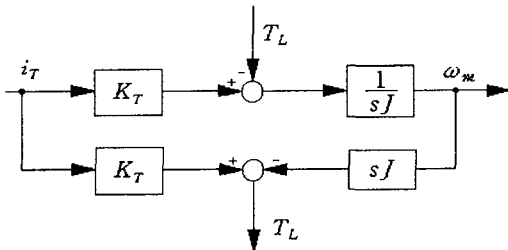


그림 4 외란추정 블록선도
Fig. 4 Disturbance estimate black diagram

그러나, 이 방법 또한 각속도의 미분이 필요하기 때문에 그 실현은 어렵고, 만약 가정이 가능하다고 하여도 고주파에서 고 이득으로 되기 때문에 관측 노이즈의 영향을 상당히 받게 된다. 그래서 식 (13)과 같이 저역통과 필터를 통하여 얻은 출력 \hat{T}_L 에 대한 추정값으로 보면 된다.

$$\hat{T}_L = \frac{1}{\tau s + 1} T_L \quad (13)$$

그림 4에 식 (13)을 결합하여 블록선도로 나타낸 것이 그림 5이다.

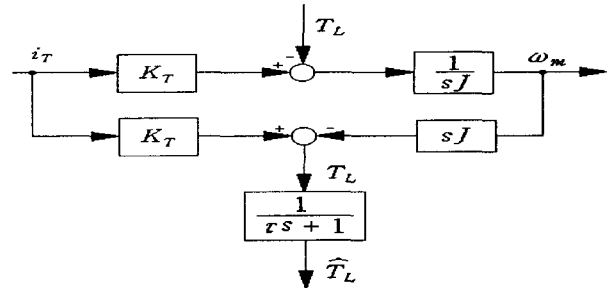


그림 5 Low-pass filter를 통한 외란 토크 추정
Fig. 5 Disturbance torque estimate with Low-pass filter

그러나 ω 에서 \hat{T}_L 까지 전달함수가 식 (14)과 같이 미분인자를 사용하지 않은 형태로 될 수 있다.

$$-\frac{J s}{\tau s + 1} = -\frac{J}{\tau} \left(1 - \frac{1}{\tau s + 1}\right) \quad (14)$$

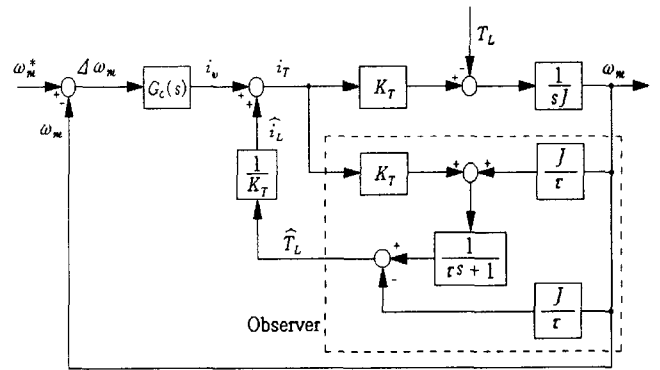


그림 6 외란 관측기와 외란 상쇄제어 블록선도
Fig. 6 Block diagram of the disturbance observer and the disturbance cancellation

위 식에 대한 블록선도는 그림 6과 같이 외란관측기를 이용한 외란상쇄 제어로 나타낼 수 있다.

여기서 외란 관측기의 극은 식 (13)의 low-pass filter의 극에相当하기 때문에 filter의 시정수를 가능한 작게 잡아서 지연이 적은 추정치를 얻을 수 있다.

2.4 시뮬레이션

본 논문에서는 표 1의 파라미터를 근거로 위에서 제시한 제어 블록선도를 구성하여 Matlab으로 시뮬레이션을 실행해 보았다. 그림 7은 부하토크 외란관측기를 적용한 전체 시스템 블록선도이다. 부하의 스텝 부하를 사용하였으며 부하의 변화를 0~10초까지 다양하게 가변 하였다.

표 1 유도전동기 파라미터

정격 출력	3.7 [KW] (5HP)
정격 전압	220 [V]
정격 전류	12.9 [A]
극 수	4 극
관성 모멘트	0.0418 [kg · m ²]
고정자 저항	0.9210 [Ω]
회전자 저항	0.5830 [Ω]
고정자 인덕턴스	0.0671 [H]
회전자 인덕턴스	0.0671 [H]
상호 인덕턴스	0.0650 [H]

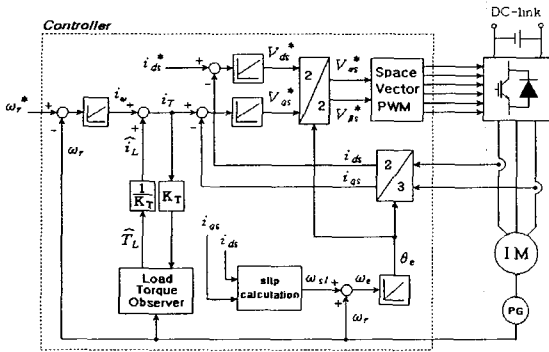


그림 7 전체 시스템 블록선도
Fig. 7 Overall system block diagram

그림 8은 PI 제어기만을 사용하였을 때 속도응답을 나타내고, 그림 9는 feedforward를 이용한 토크외란 관측기 적용 시 속도응답이다.

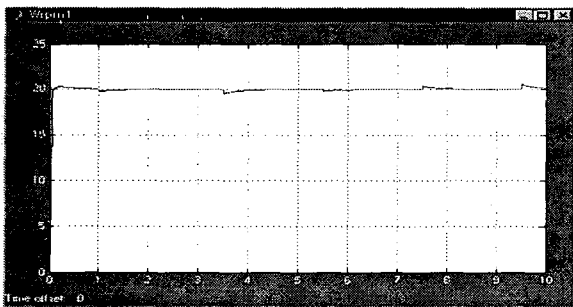


그림 8 PI 제어의 속도파형
Fig. 8 Speed waveform using PI control

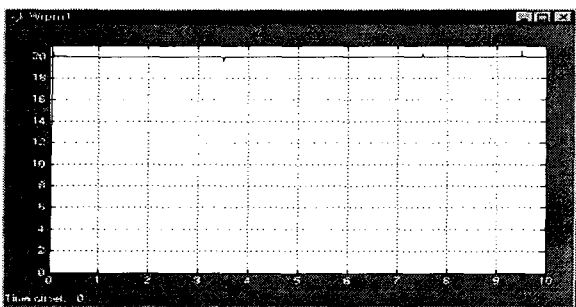


그림 9 피드포워드 제어의 속도파형
Fig. 9 Speed waveform using feedforward control

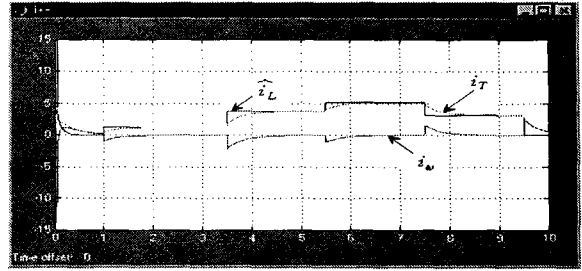


그림 10 PI 제어의 상쇄되지 않은 전류파형
Fig. 10 Non-cancellation current waveform of PI control

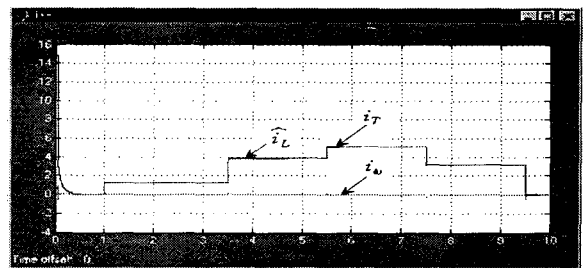


그림 11 피드포워드 제어의 상쇄된 전류파형
Fig. 11 Cancellation current waveform of feedforward control

그림 8과 그림 9에서 알 수 있듯이 외란 관측기를 사용하여 피드포워드 제어를 하였을 때 속도는 PI 제어만을 했을 경우 보다 외란의 영향을 거의 받지 않는 것을 알 수 있었다. 그림 10은 PI 제어기만 사용하였을 때 상쇄되지 않은 전류파형이고 그림 11은 피드포워드 제어를 사용하였을 경우의 상쇄된 전류파형을 나타낸다.

3. 결 론

본 논문에서는 부하 외란에 강인한 속도제어를 구현하기 위하여 부하토크 외란 관측기를 적용한 피드포워드 제어 방법을 제안하였다.

제안한 방법에 의해 시뮬레이션을 수행하였고, 그 결과 전통적인 PI제어기보다 제안된 피드포워드 방식이 부하변동에 대해 더 강인한 속도응답을 특성을 갖고 있음을 알 수 있다.

참 고 문 헌

- [1] 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
- [2] M. Iwasaki and N. Matsui, "Robust speed control of IM with torque feedforward control", *IEEE Trans. Ind. Electronic*, Vol 40, No 6, pp 553~554, 1993
- [3] 서영수, 임영배, 김영춘, 성대용, 김종관, "부하토크 피드포워드 제어를 이용한 유도전동기 속도제어", 전력전자학회지. 제3권. 제2호, pp 99~106, 1998.6