

유도전동기 운전에 대한 외란상쇄 상태 관측기 설계

김용주, 서영수
명지대학교

Design of Disturbance Cancellation State Observer for Driving Induction Motor

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.

1. 서론

최근 벡터제어이론을 적용한 유도전동기 운전시스템이 산업현장에 널리 보급되고 있으며 유도전동기 구동기술의 발전에 의해 그 적용분야 또한 다양화되고 있다.⁽¹⁾⁽²⁾⁽³⁾ 예를 들어 부하토크변동이 크게 변동하는 압착기나 컴프레서와 같은 운전에서 정속도를 유지하는 것은 중요하게 여겨질 것이다.⁽²⁾ 따라서 이러한 요구에 대한 제어기의 특성은 외란의 변화와 시스템 파라미터의 변화에 대비하여 강인한 제어를 필요로 한다.

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 출력이 스텝상태 또는 램프상태로 하는 목표치가 주어지며, 또한 스텝상태의 외란이 제어대상의 입력 측에 가해지는 경우가 있다.⁽¹⁾

본 논문에서는 전동기에서 기계적인 파라미터의 변화와 함께 외란의 변화에 대하여 외란상쇄 피드포워드 루프제어를 적용한 유도전동기의 벡터제어를 고려하였다. 제안한 시스템에서 부하토크는 유도전동기의 토크를 최소차원 상태관측기를 근거로 하여 추정한다. 상태관측기를 사용한 속도제어기는 토크에 대한 피드포워드 루프를 조건으로 하여 사용할 수 있으므로 강인한 속도제어 시스템을 실현할 수 있다. 계단입력상태의 외란에 대하여 최적제어시스템을 설계를 하였다.

2. 본론

2.1 유도 전동기 모델링

유도전동기를 상태변수의 전류와 속도에 대한 상태방정식으로 나타내면 식 (2.1)과 같다.

$$\dot{\begin{bmatrix} i_{dq} \\ \omega_r \end{bmatrix}} = A_K \begin{bmatrix} M_{11} & M_{12} \\ M_{21} & M_{22} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{dq} \\ \omega_r \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} L_1 \\ L_2 \end{bmatrix} v \quad (2.1)$$

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. 그리고, 전동기의 발생토크는 다음과 같다.

$$T = \frac{3}{2} \frac{P}{2} \frac{L_m^2}{L_r} i_{ds} i_{qs} \quad (2.2)$$

2.2 전통적인 PI속도 제어기

벡터제어 유도전동기의 기계적인 방정식은 토크 성분을 기본으로 식 (2.3)에 주어지는 것과 같다.

$$J \frac{d\omega_m}{dt} + T_L = K_T i_T \quad (2.3)$$

식 (2.3)을 기본으로 속도 제어기 $G_c(s)$ 를 사용한 전통적인 속도제어 블록선도는 그림 2.1과 같다. 그림 2.1에서 보는 것과 같이 지령속도 ω_m^* 에 대한 속도 응답 특성은 식 (2.4)와 같다.

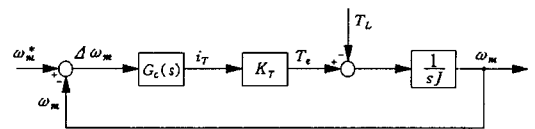


그림 2.1 속도 제어기 블록선도

$$\frac{\omega_m}{\omega_m^*} = \frac{K_T G_c(s)}{sJ + K_T G_c(s)} \quad (2.4)$$

그리고 외란에 대한 응답특성은 식 (2.5)와 같다.

$$\frac{\omega_m}{T_L} = -\frac{1}{sJ + K_T G_c(s)} \quad (2.5)$$

$T_L=0$ 와 같은 이상적인 조건에서의 속도응답은 식 (2.5)에 의하여 제어기 $G_c(s)$ 에 의해 설계되어 질 것이다. 그러나 지령속도에 대한 속도응답과 외란에 대한 응답특성 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 외란 억제응답은 개별적으로 설계할 수 없게 된다. 왜냐하면 속도 응답은 천천히 제한 될 것이지만, 반면에 외란억제

는 빠르게 기대치에 도달하기 때문이다. 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 다음과 같은 상태 방정식을 얻을 수 있다.

$$\dot{X} = AX + Bu \quad (2.6)$$

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

$$u = i_T$$

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

$$\dot{z} = \widehat{A}z + \widehat{H}Y + \widehat{B}u \quad (2.7)$$

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

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

외란 추정량은 다음과 같이 나타내고,

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

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

그리고, 관측기를 결합한 상태방정식은 식 (2.8)과 같다.

$$\frac{d}{dt} \begin{bmatrix} x \\ z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} A_{11} - A_{12}L & -A_{12} \\ H & A_{22} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x \\ z \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} A_{12} \\ 0 \end{bmatrix} r \quad (2.8)$$

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

식 (2.8)을 블록선도로 나타내면 그림 2.2와 같다.

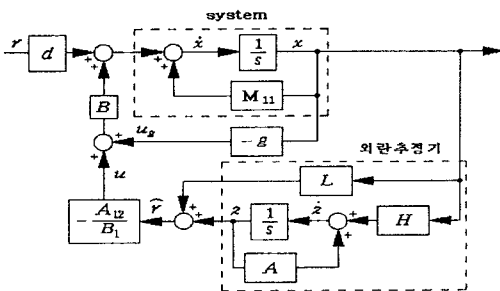


그림 2.2 외란 상쇄제어에 블록선도

2.3.2 Feedforward 외란 관측기 설계

압연기 등의 속도 및 위치 결정제어를 발생하는 모션의 분야에서는 대부분의 경우에 지배적인 외란이 토크 외란이다. 이 외란을 추정할 때는 그것을 forward-back하여 상쇄가 가능하게 되며 외란역제 제어를 행할

수 있다. 따라서 그림 2.1에 나타난 전동기의 블록선도를 예를 들어 부하의 외란토크 T_L 을 입력전류 i_T 와 각속도 ω 에서 추정하는 것을 고려한다. 또한 K_T 는 토크상수, J 는 전동기의 관성 모멘트, ω 는 축의 각속도를 나타내고, 이때 시스템에 대한 운동방정식 (2.3)을 T_L 에 대하여 나타내면 식 (2.9)와 같이 된다.

$$T_L = K_T i_T - J \frac{d\omega_m}{dt} \quad (2.9)$$

여기서, 입력전류와 각속도의 미분값에서 T_L 을 계산하여 구할 수 있다. 그리고 이 식 (2.9)를 블록선도로 나타낸 것이 그림 2.3이다.

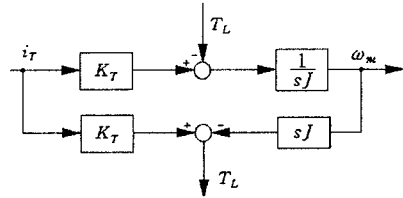


그림 2.3 외란 토크 추정

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.

$$\widehat{T}_L = \frac{1}{\tau s + 1} T_L \quad (2.10)$$

그래서 식 (2.10)과 같이 저역통과 필터를 통하여 얻은 출력 \widehat{T}_L 에 대한 추종값으로 보면 된다.

그림 2.3에 식 (2.10)을 결합하여 블록선도로 나타낸 것이 그림 2.4이다.

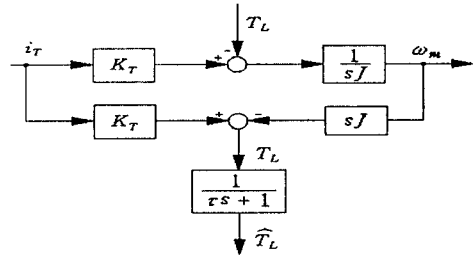


그림 2.4 Low-pass Filter를 통한 외란 토크 추정

그러나 ω 에서 \widehat{T}_L 까지 전달함수가 식 (2.11)과 같이 미분인자를 사용하지 않은 형태로 될 수 있다.

$$-\frac{Js}{\tau s + 1} = -\frac{J}{\tau} \left(1 - \frac{1}{\tau s + 1}\right) \quad (2.11)$$

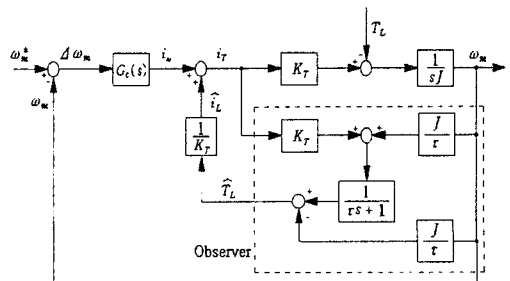


그림 2.5. 외란 관측기와 외란 상쇄제어 블록선도

위 식에 대한 블록선도는 그림 2.5와 같이 외란관측기를 이용한 외란상쇄 제어로 나타낼 수 있다.

여기서 외란 관측기의 극은 식 (2.10)의 low-pass filter의 극에 상당하기 때문에 filter의 시정수를 가능한 작게 잡아서 지연이 적은 추정치를 얻을 수 있다.

2.4 시물레이션

본 논문에서는 표 2.1의 파라미터를 근거로 위에서 제시한 제어 블록선도를 구성하여 Matlab으로 시물레이션을 실행해 보았다. 그림 2.6은 부하토크 외란 관측기를 적용한 전체 시스템 블록선도이다. 부하는 스텝 부하를 사용하였으며 부하의 변화를 0~10초까지 다양한 게 가변 시켜 보았다.

표 2.1 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]
고정자인덕턴스	0.0671 [H]
회전자인덕턴스	0.0671 [H]
상 호 인덕턴스	0.0650 [H]

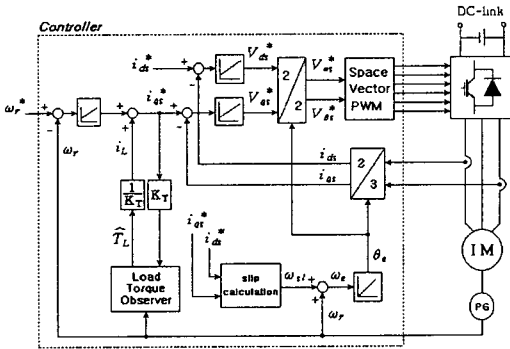


그림 2.6 전체 시스템 블록선도

그림 2.7은 PI 제어기만을 사용하였을 때 속도의 응답을 나타내고, 그림 2.8은 feedforward를 이용한 토크 외란 관측기 적용 시 속도 응답이다. 그리고 그림 2.9는 feedforward제어 시 i_d, i_q 전류파형을 나타낸다.

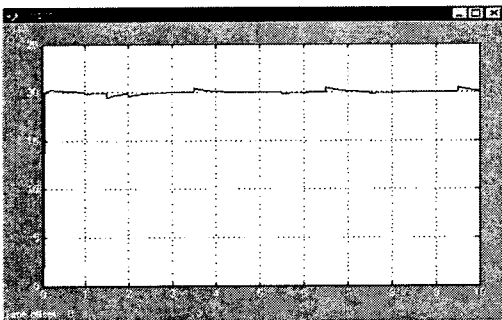


그림 2.7 PI 제어기만을 적용하였을 시 속도 응답

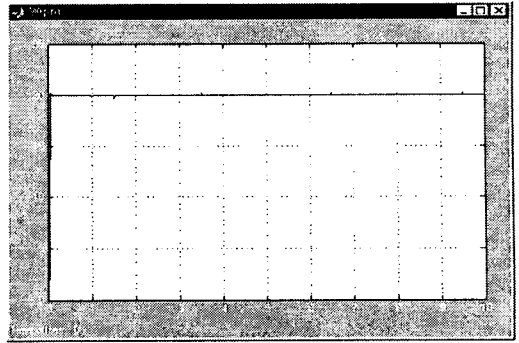


그림 2.8 부하토크 외란 관측기를 적용한 feedforward제어 시 속도 응답

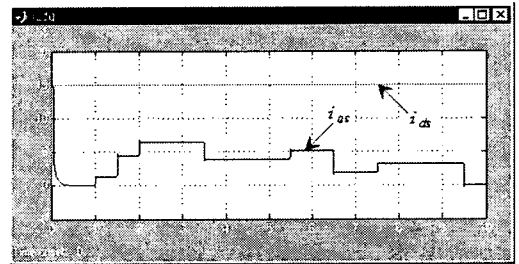


그림 2.9 feedforward제어 시 i_d, i_q 전류파형

그림 2.7과 그림 2.8에서 알 수 있듯이 외란 관측기를 사용하여 feedforward제어를 하였을 시 속도는 PI 제어만을 했을 때 보다 외란의 영향을 거의 받지 않는 것을 알 수 있었다.

3. 결 론

본 논문에서는 부하 외란에 강인한 속도제어기를 구현하기 위하여 부하토크 외란 관측기를 적용한 feedforward제를 제안하였다.

제안한 방법에 의해 시물레이션을 수행하였고, 그 결과 PI제어를 적용하였을 때보다 관측기를 이용한 feedforward 제어가 부하변동에 대하여 속도변동이 크게 억제되었음을 알 수 있었다. 따라서 전통적인 PI제어기보다 제안된 feedforward 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, 김종균, "부하토크 피드포워드 제어를 이용한 유도전동기 속도제어", 전력전자학회지, 제3권, 제2호, pp 99~106, 1998.6