

전동기 운전을 위한 외란상쇄 관측기 설계

김용주, 서영수
명지대학교

Design of Disturbance Cancellation for Motor Driving

Yong-ju Kim and Young-soo Seo
Myongji University

ABSTRACT

This paper designed 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. 서 론

최근 벡터제어이론을 적용한 유도전동기 운전시스템이 산업현장에 널리 보급되고 있으며 유도전동기 운전기술의 발전에 의해 그 적용분야 또한 다양화되고 있다.^{[1][2][3]} 또한, 압착기나 컴프레서와 같은 운전에서 부하외란에 대하여 속도 변동이 없는 즉, 정속도로 유지하는 것은 매우 중요하게 여겨진다. 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 feedforward 외란상쇄를 설계하고자 한다.

본 논문에서는 외란의 변화에 대하여 외란상쇄 피드포워드 루프제어를 적용한 유도전동기의 벡터제어를 Matlab을 이용하여 설계하였다. 제안한 시스템에서 유도전동기의 부하토크는 최소차원 상태관측기를 근거로 하여 추정한다. 상태관측기를 사용한 속도제어기는 토크에 대한 feedforward 루프를 조건으로 하여 사용할 수 있으므로 강인한 속도제어 시스템을 설계할 수 있다.

2. 본 문

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.

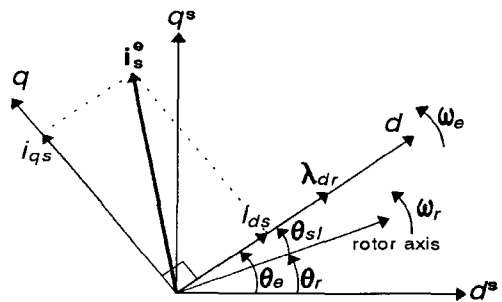


그림 1 회전자 쇄교자속 벡터도
Fig. 1 Vector diagram of rotor flux

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

그림 1에서 고정자의 d축을 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 식 (4)와 같다.

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

위 식 (4)에서 θ_e 를 산출하기 위하여 Matlab으로 나타낸 것이 그림 2이다.

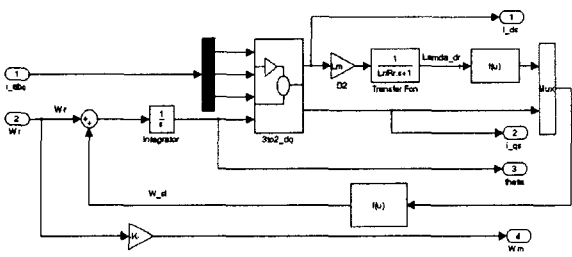


그림 2 θ_e 산출을 위한 Matlab 모델링
Fig. 2 Matlab modeling for θ_e production

전동기의 발생토크는 식 (5)와 같다.

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

위의 식 (1)과 (5)를 이용하여 Matlab 모델링을 그림 3과 같이 나타낸다.

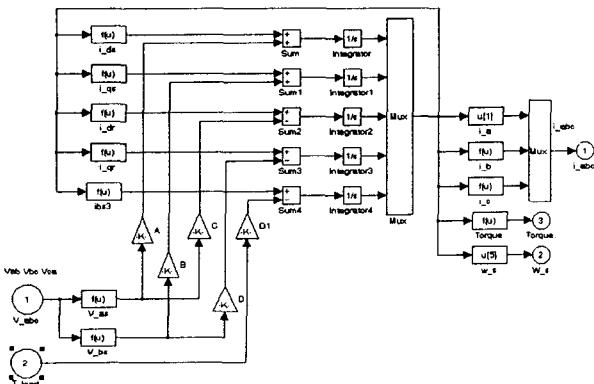


그림 3 유도전동기 Matlab 모델링
Fig. 3 Matlab modeling of induction motor

2.2 외란 상쇄제어

유도전동기의 시스템 방정식 x 와 외란의 방정식 r 를 이용하여 식 (6)와 같은 상태 방정식을 얻을 수 있다.

$$\dot{X} = AX + Bu \quad (6)$$

여기서

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

$$u = i_T$$

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

$$\dot{z} = \widehat{A}z + \widehat{H}Y + \widehat{B}u \quad (7)$$

여기서,

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

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

또한, L 을 결정함에 있어서, 관측기 행렬식과 시스템 행렬식을 각각 식 (8)과 식 (9)와 같이 나타낸다.

$$\dot{\hat{x}}(t) = A\hat{x}(t) + Bu(t) - L[\hat{y}(t) - y(t)] \quad (8)$$

$$\dot{x}(t) = Ax(t) + Bu(t) \quad (9)$$

위 식 (8)과 (9)의 차를 구하면 식 (10)과 같이 된다.

$$\dot{\hat{x}}(t) - \dot{x}(t) = (A - LC)[\hat{x}(t) - x(t)] \quad (10)$$

위 식 (10)에서 상태 관측오차 $e(t) = \hat{x}(t) - x(t)$ 로 정의하여 나타내면 식 (11)과 같이 된다.

$$\dot{e}(t) = (A - LC)e(t) \quad (11)$$

여기서 $A - LC$ 가 안정하도록 L 값을 선정하면 초기 관측기 오차가 존재하더라도 $t \rightarrow \infty$ 이면 $e(t) \rightarrow 0$ 로 되어 결국 $\hat{x}(t) \rightarrow x(t)$ 와 같은 성질을 가지게 된다.

외란 추정량은 다음과 같이 나타내고,

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

피드포워드 제어 입력은 식 (12)와 같이 나타낸다.

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

그리고, 관측기를 결합한 상태방정식은 다음 식과 같다.

$$\frac{d}{dt} \begin{bmatrix} x \\ z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} A_{11} - A_{12}L & -A_{12} \\ H & A_{22} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x \\ z \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} A_{12} \\ 0 \end{bmatrix} r \quad (13)$$

여기서,

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

2.3 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 4에 나타낸 전동기의 블록선도를 예를 들어 부하의 외란토크 T_L 을 입력전류 i_T 와 각속도 ω_m 에서 추정하는 것을 고려한다.

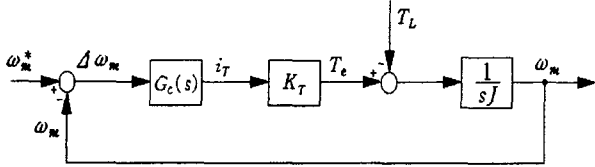


그림 4 속도 제어기 블록선도
Fig. 4 Speed controller block diagram

시스템에 대한 운동방정식을 T_L 에 대하여 나타내면 식 (14)와 같이 된다.

$$T_L = K_T i_T - J \frac{d\omega_m}{dt} \quad (14)$$

여기서, 입력전류와 각속도의 미분값에서 T_L 을 계산하여 구할 수 있다. 식 (14)를 Matlab으로 모델링한 것이 그림 5이다.

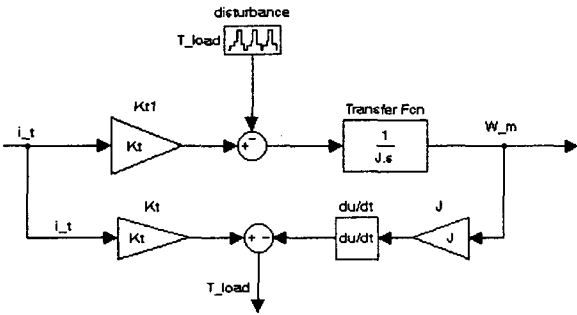


그림 5 외란추정 모델링
Fig. 5 Disturbance cancellation modeling

그러나, 이 방법 또한 각속도의 미분이 필요하기 때문에 그것의 실제 실현은 어렵게 되고, 만약 가정이 가능하다고 하여도 고주파에서 고이득으로 되기 때문에 관측 노이즈의 영향을 상당히 받게 된다. 그래서 식 (15)와 같은 저역통과 필터를 통하여 얻은 출력을 T_L 에 대한 추정값 \hat{T}_L 로 볼 수 있다.

$$\hat{T}_L = \frac{1}{\tau s + 1} T_L \quad (15)$$

위 식 (15)와 그림 5를 결합하여 그림 6과 같이 모델링할 수 있다.

그러나 ω_m 에서 \hat{T}_L 까지 전달함수가 식 (16)과 같이 미분인자를 사용하지 않은 형태로 될 수 있다.

$$-\frac{I s}{\tau s + 1} = -\frac{I}{\tau} \left(1 - \frac{1}{\tau s + 1}\right) \quad (16)$$

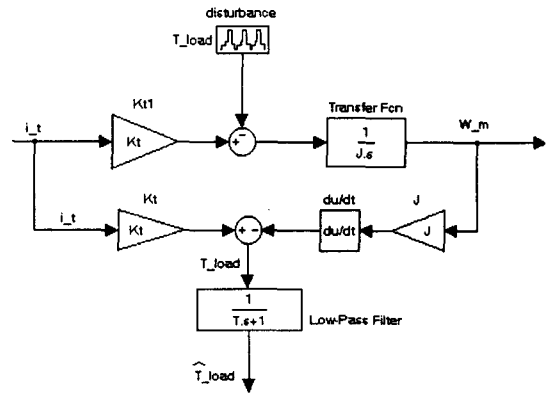


그림 6 Low-pass filter를 통한 외란 토크 추정
Fig. 6 Disturbance torque estimate with Low-pass filter

위 식 (16)에 대한 시뮬링크는 그림 7과 같이 외란관측기를 이용한 외란상쇄 제어로 나타낼 수 있다.

여기서 외란 관측기의 극은 식 (15)의 low-pass filter의 극에相当하기 때문에 filter의 시정수를 가능한 작게 잡아서 지연이 적은 추정치를 얻을 수 있다.

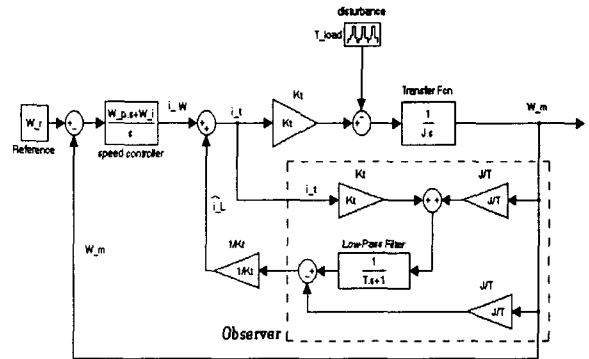


그림 7 Matlab을 이용한 외란 관측기 모델링
Fig. 7 Disturbance observer modeling using Matlab

2.4 시뮬레이션

본 논문에서는 표 1의 파라미터를 근거로 위에서 제시한 제어 블록선도를 구성하여 Matlab으로 시뮬레이션을 실행해 보았다. 그림 8은 부하토크 외란관측기를 적용한 Matlab 전체 시스템 모델링이다. 부하는 스텝 부하를 사용하였으며 부하의 변화를 0~10초까지 다양하게 가변하였고, 지령속도는 20[rpm]을 입력으로 넣어보았다.

그림 9는 PI 제어기만을 사용하였을 시 각각의 전류파형을 나타내는 것이고, 그림 10은 feedforward를 이용한 토크 외란 관측기 적용 시 각각의 전류파형이다.

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]

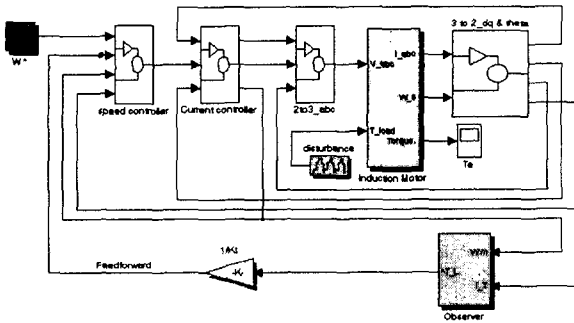


그림 8 전체 시스템 Matlab 모델링
Fig. 8 Matlab modeling of overall system

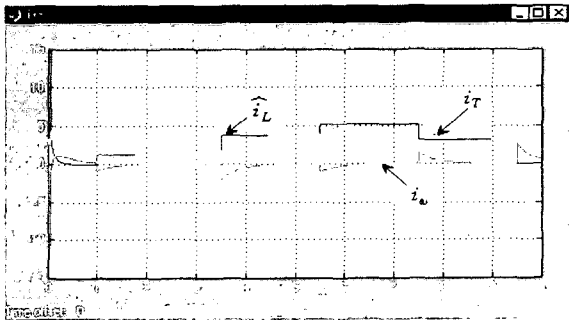


그림 9 PI 제어의 상쇄되지 않은 전류파형
Fig. 9 Non-cancellation current waveform of PI control

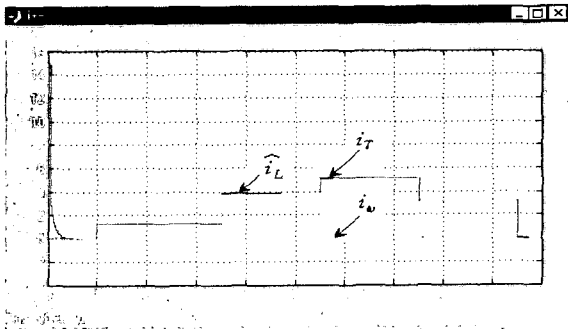


그림 10 피드포워드 제어의 상쇄된 전류파형
Fig. 10 Cancellation current waveform of feedforward control

그림 9와 그림 10에서 알 수 있듯이 외란 관측기를 사용하여 feedforward제어를 하였을 시 전류는 PI제어만을 했을 때 보다 외란의 영향을 거의 받지 않는 것을 알 수 있다. 즉, 그림 7에서 보여주는 것처럼 $i_w + \hat{i}_L = i_T$ 가 되므로, 만약 속도 변동이 없다면 $\Delta\omega_m$ 은 항상 "0"이 되어 $\hat{i}_L = i_T$ 가 된다. 그러나, 만약 부하 외란이 들어오면 동시에 외란의 크기만큼의 \hat{T}_L 이 발생되어 feed-forward 해줌으로써 외란 T_L 전류와 추정치 \hat{T}_L 전류가 서로 같게되어 속도의 변동은 없게 된다.

그림 11은 feedforward 제어 시 속도응답 파형이다.

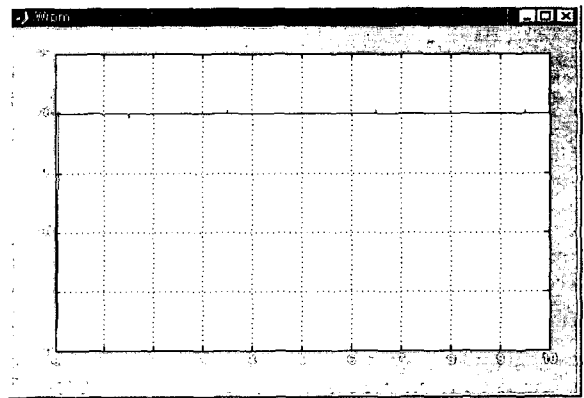


그림 11 피드포워드 제어의 속도파형
Fig. 11 Speed waveform using feedforward control

3. 결 론

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

설계 순서대로 Matlab에 의해 시뮬레이션을 수행하였고, 그 결과 전통적인 PI제어기보다 제안된 피드포워드 방식이 부하변동에 대해 더 강인한 속도응답을 특성을 갖고 있음을 알 수 있었다.

참 고 문 헌

- [1] N. Kenzo and N. Hidekazu and H. Mitsuo, "Matlab을 이용한 制御系設計", 東京電氣大學出版社, 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.
- [4] 서영수, "전동력 제어", 도서출판 대경 pp 291~394, 1999.3.