

퍼지논리를 이용한 옵저버 시스템에 의한 유도전동기의 빠른 자속 및 속도 추정제어에 관한 연구

황리훈,* 이춘상,* 김종래,* 장병곤,* 이상용,* 나승권,* 손영태,* 김현우,** 조문택***
 세명대학교 전기전자공학부 * 경민대학 소방안전과,** 대원공과대학 전기과***

A study on the rapid flux and speed estimation control of induction motor by the observer system using a Fuzzy logic

Lak-Hoon Hwang,* chun-sang Lee,* Jong-lae Kim,* Byong-Gon Jang,*
 Sang-Yong Lee,* Seng-Kwon Na,* Hyun-Woo Kim,** Moon-Tack Cho***
 Semyung Univ,* Kyungmin College,** Deawon Technical College.***

Abstract - The information of the motor speed and flux are more necessary than the other informations which have to get for the induction motor drive. which is the exact informations of the speed and flux are known without the speed and flux sensors, many problems for induction motor drive will be solved.

In this paper, it is studied on the method able to get the informations of the speed and the flux for the induction motor. The informations for the rotator speed and flux of the induction motor are estimated exactly and rapidly by the observer system proposed in this paper and the induction motor is controlled by those informations of the speed and flux exactly and rapidly by the fuzzy controller set in the observer system.

1. 서 론

최근에는 전력변환장치인 인버터에 의해 유도전동기의 속도제어가 매우 정밀하고 양호하게 이루어지고 있으나, 정밀한 속도제어를 위해서는 정확한 회전속도의 측정이 필수적으로 요구된다. 따라서, 회전속도를 측정하기 위해 전동기에 설치되어야 하는 속도검출장치는 전동기와 기계적으로 직결되어야 하고 제어기와 멀리 떨어져 있어야 하는 경우가 많다. 연산을 통하여 내부자속을 구하여 전동기를 제어하는 방법에는 다음 두 가지가 있다. 고정자전류를 직접 제어하는 과정에서 자속을 설정값으로 하여 토오크를 제어하는 방법¹⁾과 자속을 계산하는 과정에서 속도를 연산하여 제어하는 방법이 있다.^{2),3)} 본 연구에서는 속도를 직접 검출하지 않고, observer system에 퍼지논리를 적용하여 간접적으로 유도전동기의 정확한 속도를 검출하고자 하는 두 번째 방법에 근거하여 자속 및 속도를 연산하였으며 이를 위하여 상태변수를 빠르게 추정하는 observer 시스템을 응용하고, observer의 필요한 내부변수를 추정하기 위하여 퍼지제어기⁴⁾를 사용함으로써 유도전동기에 대한 정확한 속도정보를 추정하고자 한다.

2. 자속 추정을 위한 기본식

2.1. 유도전동기 기본식

유도전동기를 고정좌표계에 의해 고려해 보면 유도전동기 전압방정식은 다음 식(1)과 같이 표현된다.

$$\begin{pmatrix} v_{\omega} \\ v_{\delta} \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} R_s + pL_s & 0 & pM & 0 \\ 0 & R_s + pL_s & 0 & pM \\ pM & -w_r M & R_r + pL_r & -w_r L_r \\ w_r M & pM & w_r L_r & R_r + pL_r \end{pmatrix} \begin{pmatrix} i_{\omega} \\ i_{\delta} \\ i_{or} \\ i_{dr} \end{pmatrix} \quad (1)$$

위의 기본식으로부터 연산하고자 하는 변수는 전동기의 내부자속이므로 (2)식과 같이 자속에 대한 식으로 변형시킨다.

$$\begin{pmatrix} v_{\omega} \\ v_{\delta} \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} R_s + p\sigma L_s & 0 & \frac{pM}{L_r} & 0 \\ 0 & R_s + p\sigma L_s & 0 & \frac{pM}{L_r} \\ -\frac{MR_r}{L_r} & 0 & \frac{R_r}{L_r} + p & -\omega_r \\ 0 & -\frac{MR_r}{L_r} & \omega_r & \frac{R_r}{L_r} + p \end{pmatrix} \begin{pmatrix} i_{\omega} \\ i_{\delta} \\ \psi_{or} \\ \psi_{dr} \end{pmatrix} \quad (2)$$

($\sigma = 1 - \frac{M^2}{L_s L_r}$: 누설계수)

식(2)의 변수중에서 전동기의 입력전압과 전류는 측정 가능한 변수이고, 자속과 속도는 측정되지 않는 변수이다.

또한 유도전동기의 상태해석을 위하여 식(2)는 다음 식(3)과 같이 정리할 수 있다.

$$\dot{x} = A_x + B_x \dots \dots \dots (3)$$

여기서 $x = \begin{pmatrix} i_{\omega} \\ i_{\delta} \\ \psi_{or} \\ \psi_{dr} \end{pmatrix}$ 이고, $u = \begin{bmatrix} v_{\omega} \\ v_{\delta} \end{bmatrix}$ 이다.

토오크는 다음 식(4)와 같이 자속과 전류의 곱으로 나타내어진다.

$$T = \frac{3}{2} \left(\frac{P}{2} \right) \cdot (\psi_{dr} \cdot i_{\omega} - \psi_{or} \cdot i_{\delta}) \dots \dots \dots (4)$$

이때, 부하토오크 T_L 과 관성모우먼트 J 및 회전 각속도 ω_r 의 관계는 다음 식(5)와 같다.

$$T_L = J \frac{d\omega_r}{dt} + d\omega_r \dots \dots \dots (5)$$

따라서 식(4)와 식(5)의 관계에 의하여 추정된 자속과 전류로서 유도전동기의 회전각속도 ω_r 을 구할 수 있게 된다.

2.2. 회전자 자속연산

자속은 측정이 되지 않는 상태변수이므로 자속의 상태를 추정하기 위하여 그림1과 같은 observer 시스템을 사용한다.

식(3)의 행렬 A의 변수 ω_r 은 전동기의 회전자 각속도이고, 전동기의 상태에 따라 광범위하게 변하는 변수이다. 따라서 식(3)에서 ω_r 을 추정해야만 그림1의 observer시스템에 의한 관측이 가능하게 된다.

식(4)는 전동기의 d-q축 성분 전류와 자속에 의한 발생 토오크 식이고, 식(5)는 관성 모우먼트 등 부하조건에 따른 부하 토오크식이므로 식(4)와 식(5)의 관계에 의해서 유도전동기 회전각속도 ω_r 은 전동기의 토오크와 부하 토오크의 상태에 따라 결정되어 가속 또는 감속된다.

그림1의 observer시스템 내에서 전동기와 관측자 사이의 전류 오차성분에 자속을 곱한 토오크오차는 전동기의 토오크와 속도를 추정하는 관측자의 관측 오차가 있음을

뜻하고, 이 토크 오차는 속도 오차와 밀접한 관계를 갖는다. 따라서 ω_r 을 추정하는 속도 추정기가 필요하며,

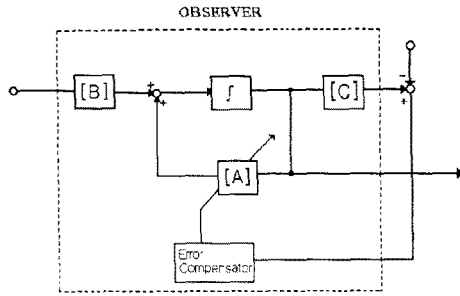


그림 1. 회전자 자속추정 블록도

속도추정기를 이용한 observer시스템에 의하여 자속을 연산한다. 또한 속도추정기의 입력은 입력 토크 오차가 되고, 이때 속도추정기는 빠른 응답을 가지고 입력 토크 오차를 0으로 만드는 ω_r 을 연산하여야 한다. 속도추정기 입력인 토크 오차는 속도추정기 입력측에 포함된 식으로서 식(6)과 같으며,

$$T_{err} = \frac{3}{2} \left(\frac{P}{2} \right) \cdot \overline{\psi}_r (i_s^* - i_s) \quad \dots \dots \dots (6)$$

식(6)에서의 전류 오차는 다음 식(7)과 같이 표현된다.

$$\begin{aligned} i_{qs}^* &= i_{qs}^* - i_{qs} \\ i_{ds}^* &= i_{ds}^* - i_{ds} \end{aligned} \quad \dots \dots \dots (7)$$

(6)과 식(7)의 관계에서 식(6)은 두 축 성분에 대한 수기로서 다음 식(8)로 정리되며,

$$T_{err} = \frac{3}{2} \left(\frac{P}{2} \right) \cdot (\psi_{dr} \cdot i_{qs}^* - \psi_{qr} \cdot i_{ds}^*) \quad \dots \dots \dots (8)$$

여기서, T_{err} : 토크오차

i_{qs}^* : q축 성분 전류오차

i_{ds}^* : d축 성분 전류오차

따라서, 식(8)의 토크오차성분 T_{err} 를 빠르게 0으로 만드는 속도추정기를 설계하여야 한다.

2.3. 퍼지제어기

제어규칙의 형식은 출력편차 E와 한 번의 샘플링 기간 동안의 편차 변화분 ΔE 를 입력하고, 제어기의 출력량을 U로 한다. 또 그 변화분 ΔU 를 라 하고 목표량을 R이라 표시하면, 다음 식(9)가 성립하게 된다.

$$\begin{aligned} \Delta E &= E_M - E_{M-1} = (R - Y_M) - (R - Y_{M-1}) = Y_{M-1} - Y_M \\ \Delta U &= U_M - U_{M-1} \end{aligned} \quad \dots \dots \dots (9)$$

식(9)에서 알 수 있는 바와 같이 ΔE 는 출력 Y의 기울기 부호를 역으로 한 것으로서 출력이 상승하고 있을 때 $\Delta E < 0$ 가 되고, 출력이 하강하고 있을 때 $\Delta E > 0$ 이 되는 것을 알 수 있다. 퍼지제어기의 입출력 관계는 E, $\Delta E \rightarrow \Delta U$ 로 표현되며, E와 ΔE 로부터 ΔU 를 추론하는 구조이므로, 출력성분은 입력성분을 적분한 값이다.

따라서 E와 ΔU 에 대한 관계는 다음 식(10)과 같이 표현할 수 있다.

$$U(t) = K_I \int E(t) dt \quad \dots \dots \dots (10)$$

여기서 ΔE 와 ΔU 이 관계는 다음 식(11)과 같이 표현된다.

$$\Delta U(t) = K_p \cdot \Delta E(t) \quad \dots \dots \dots (11)$$

따라서 위의 식(10) 식(11)의 관계를 보면 이 제어기는 퍼지이론이 도입된 PI제어기 형태로 동작함을 알 수 있다. 그림 2에 의해 보면 관측자에서 관측자 입력은 다음 식(12)으로 표현된다.

$$\frac{d}{dt} x = Ax + Bu_s + G(i_s^* - i_s) \quad \dots \dots \dots (12)$$

식(12)에서 i_s^* 는 빠른 속도로 i_s 와 일치해야 하며, 이때의 G는 관측자가 보다 빠르게 안정될 수 있도록 하는 observer gain으로서 유도전동기의 자속이 부하 변동시에도 보다 정확하고 빠르게 추정될 수 있도록 하였다.

2.4. 자속 및 속도 추정을 위해 제안된 observer 시스템

그림2는 자속 및 속도를 추정하기 위하여 본 시스템에서 사용한 observer시스템의 블록도이다.

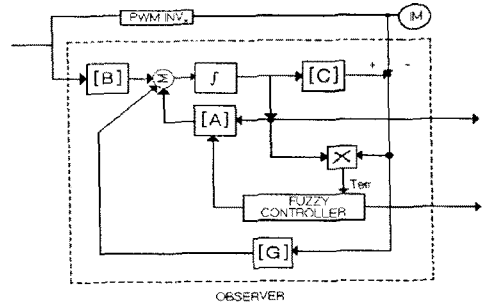


그림 2. 제안한 observer system

observer는 시스템의 상태변수와 상태관측자의 상태변수와의 오차를 최소한으로 하도록 설계를 한다. 그러므로 observer설계시 적절한 observer gain G를 적용하여 오차가 가능한 빠르게 0으로 진입하도록 하였다.

2.5. observer시스템의 자속 및 속도 시뮬레이션

본 연구에서 제안한 observer 시스템에 대한 컴퓨터 시뮬레이션을 실행하기 위해 상태방정식을 이용하여 시뮬레이션을 한 결과 그림 3과 같이 나타내었다.

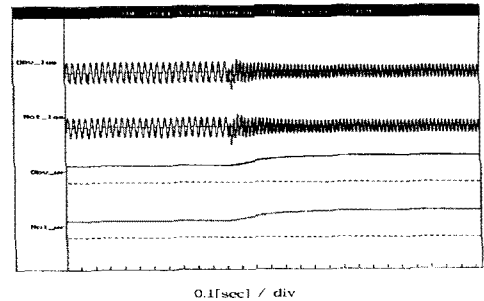


그림 3. 입력 주파수 변화시 observer 상태추정

그림3은 유도전동기에 입력되는 전압의 주파수를 증가시켜 전동기의 속도를 증가시켰을 경우 전동기 및 observer의 q축 전류응답과 속도에 대한 응답을 보여주고 있다. 전동기의 입력주파수 변화에 따라 과도상태시를 포함하여 observer가 전동기의 상태를 매우 양호하게 추종하고 있음을 보여주고 있다.

그림4의 전동기 전류파형은 주파수 변화시 전류가 증가한 후 속도가 정상상태에 도달한 후 전류가 감소하고 있으며, 그에 대한 observer의 d축, q축 전류에 대한 관측오차를 나타내는 것으로 관측오차가 과도상태시도 거의 나타나지 않음으로서 관측결과가 매우 양호함을 보이고 있다.

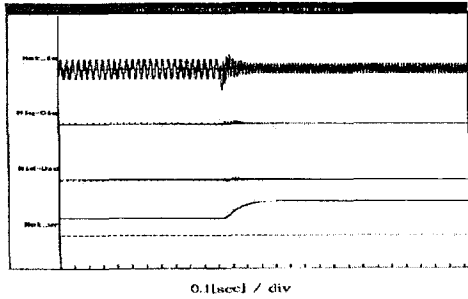


그림 4. 주파수 변화시 속도 및 q축, d축에 대한 observer의 관측오차

3. 실험 및 결과 고찰

본 연구에서 PWM 인버터를 이용하여 농형 유도전동기를 구동하기 위해 제안된 observer시스템에 제어기를 도입하여 구동한 결과 정상상태시는 물론 과도상태시에도 전동기의 전류 및 속도를 양호하게 추정하고 있었으며, 두 축 성분분의 자속도 정확하게 구하여졌다.

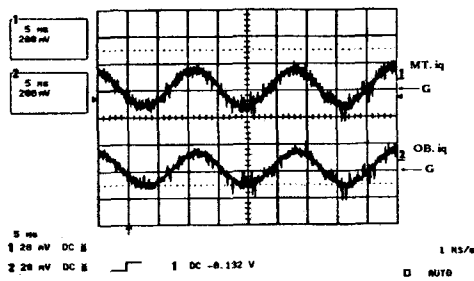


그림 5. 전동기 및 observer 전류파형

그림5는 3상 전동기 입력 전류 파형을 전류검출기에 의해 검출하여 고정좌표계로 변환한 q축 전류인 i_q 와 observer에 의해 관측된 q축 전류를 비교한 것으로서 전류의 크기 및 위상이 실제의 전류파형과 일치하고 있음을 보이고 있으므로, 본 시스템에 적용한 observer시스템이 전동기의 전류를 매우 양호하게 관측하고 있음을 보이고 있다. 그림6은 전동기가 정지상태에서 기동하여 정격속도에 도달할 때까지 observer의 토오크 추종 전류에 대한 속도 관측상태를 보이고 있다. 이 그림에서 볼 때 전동기의 속도변화에 대하여 토오크 전류의 추종이 정확하게 이루어지고 있음을 알 수 있다.

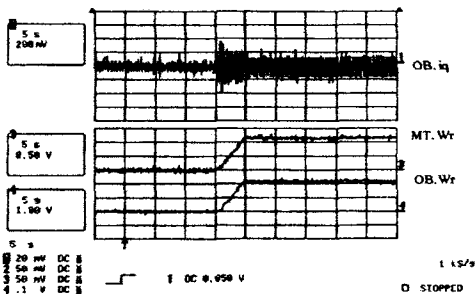


그림 6. observer ω_r 및 전류파형 ω_r

따라서 observer가 전동기 속도 및 전류를 매우 양호하게 추종하고 있음이 입증되고 있다.

이상의 결과에서 볼 때 속도 검출기가 없는 유도전동기 구동시 전동기의 회전자 속도 및 자속에 대한 정보가 본 논문에서 제안한 observer시스템에 의해 별도의 속도 및 자속검출 장치가 없이 전동기의 입력측 전류 및 전압에 대한 정보만으로도 매우 양호하게 추정됨을 알 수 있다.

4. 결론

유도전동기의 제어에 있어서 속도의 정보는 필수적이라 할 수 있으나 이를 위하여 설치되는 속도검출기는 전동기에 직결되어 설치되므로 제어기와 멀리 있을 경우 전력 변환기의 스위칭 노이즈 등으로 인하여 시스템의 제어가 불안정하게 된다.

본 연구에서는 속도 검출기가 없는 유도전동기의 제어시 제어를 위한 속도 및 자속에 대한 정보가 필수적이므로, 별도의 속도 및 자속 검출기를 이용하지 않고 전동기에 입력되는 전압 및 전류에 대한 정보만을 이용하여 정확한 속도 및 자속에 대한 정보를 얻기 위하여 observer시스템을 적용하였다. observer시스템내에 퍼지 제어기를 적용시켰으며, 전동기 제어시 일반 제어기에서 구현할 수 없는 애매한 부분을 퍼지제어의 독특한 특성을 이용하여, 일반적으로 많이 이용되는 PI제어기를 이용할 때 보다 더욱 빠른 응답을 얻을 수 있었다. 본 연구에서 이용된 observer시스템은 유도전동기의 입력 전압 및 주파수 그리고 부하의변화 시에도 전동기 속도 및 전류를 매우 양호하게 추종하였고, 추정오차를 관측한 결과 속도 및 자속추정시 오차발생에 대한 제어기의 신속한 동작에 의해 오차발생이 순간 제거됨을 확인하였다. 이상의 결과로부터 본 연구에서 제안한 observer시스템은 별도의 속도 검출장치가 없이 전동기의 상태를 양호하게 추정할 수 있음을 확인하였다.

[참고문헌]

1. 奥山 後昭, "速度, 電壓 센사나시벡トル 制御의 現狀と 應用例" 平成3年 電氣學會全國大會 pp.S.9-15 ~18, 平成3年.
2. Ichiroh Miyashita and Youichi Ohmori Toyo Electric Mfg.Co., Ltd., "Speed sensorless high-speed torque and speed control of induction motor based on instantaneous spatial vector theory" IPEC-TOKYO pp.1144 ~ 1151, 1994.
3. Ichiroh Miyashita and Youichi Ohmori Toyo Electric Mfg.Co., Ltd., "Improvement of robustness on speed sensorless vector control of induction motor" EPE pp.4-660~4-665,1991.
4. Ichiro Miki, Tatsuo Kumano, Shunji Takahashi, Tetsuo Yamada, "Fuzzy PI Auto Tuning System for Vector-Controlled Induction Motor Drives" PCC-Yokohama pp.678~682, 1993.
5. C.Ilas, A.Bettini, L.Ferraris, G.Griva, F.Profumo, "Comparison of Different schemes without Shaft Sensors for Field Oriented Control Drives" IEEE pp.1579~1588, 1994.
6. Hisao Kubata, Kouki Matsuse, "Speed Sensorless Field Oriented Control of Induction Motor with Rotor Resistance Adaption" IEEE pp.414~418, 1993.