

퍼지제어기를 이용한 유도전동기의 센서리스 속도제어에 관한연구

김 성환^o, 오 상호, 권 영안
부산대학교 전기공학과

Sensorless Control of Induction Motor with Fuzzy Controller

Sung-Hwan Kim, Sang-Ho Oh, and Young-Ahn Kwon
Dept. of Electrical Engineering, Pusan National University

Abstract - A sensorless drive of induction motor has several advantages: low cost and availability in a harsh environment. Most of sensorless control schemes are based on the direct estimation of rotor speed from state observer. This study proposes a new sensorless control scheme. The proposed scheme is based on a reference model control which the error between the model and plant outputs decays to zero as time proceeds. The actuating signal is calculated from the fuzzy controller which increases the system stability and robustness. The simulation results indicate a good dynamic performance.

1. 서론

산업용용분야에서 가변속 전동기 구동시스템의 설치환경, 가격 등의 제약으로 인하여 위치 및 속도센서없는 속도제어에 대한 관심이 고조되고 있다. 종래의 구동방식으로서 벡터제어나 선형제어등은 속도정보를 필요로 한다. 이러한 구동방식에서 센서리스제어를 실현하기 위해 입력전압과 전류값을 이용하여 회전자의 회전속도를 추정하는 상태관측기에 의한 방법들이 발표되었다. [1-2]

본 논문에서는 모델기준제어를 기반으로 하는 퍼지제어기를 도입한 센서리스 속도제어를 제안한다. 이 방식은 실제 유도전동기 전류와 기준 모델전류의 차이를 억제함으로써 전동기의 속도가 목표치인 지령속도를 추종하도록 하는 것이다. 또한, 전류센서의 오차, 전동기 파라메타의 변화, 부하변동 등의 영향아래에서도 시스템의 강인성이 유지되는 퍼지제어기를 사용하였으며 본 알고리즘을 적용하여 시뮬레이션 한 결과 양호한 속도응답 및 동적특성을 보여주고 있다.

2. 시스템 구성

고정자 기준 d-q좌표계에 의한 유도전동기의 수학적모델은 아래와 같은 비선형시스템으로 나타낼 수 있다.

$$\begin{aligned}x_1 &= a_{11}x_1 + a_{12}x_5x_2 + a_{13}x_3 + a_{14}x_5x_4 + b_1u_1 \\x_2 &= a_{21}x_5x_1 + a_{22}x_2 + a_{23}x_5x_3 + a_{24}x_4 + b_2u_2 \\x_3 &= a_{31}x_1 + a_{32}x_5x_2 + a_{33}x_3 + a_{34}x_5x_4 + b_3u_1 \\x_4 &= a_{41}x_5x_1 + a_{42}x_2 + a_{43}x_5x_3 + a_{44}x_4 + b_4u_2 \\x_5 &= \frac{1}{J} [a_{51}(x_1x_4 - x_2x_3) - T_L]\end{aligned}$$

단,
 x_1 : q축 1차전류
 x_2 : d축 1차전류
 x_3 : q축 2차전류
 x_4 : d축 2차전류
 x_5 : 회전자의 각속도
 u_1 : q축 1차전압
 u_2 : d축 1차전압
 J : 관성모멘트
 T_L : 부하토오크
 $a_{11} \dots a_{51}, b_1 \dots b_4$: 전동기의 전기적인 파라메타에 의해 결정되는 값

그림1은 본 논문에서 제안하는 유도전동기 센서리스 속도제어 시스템의 기본구성을 나타낸다.

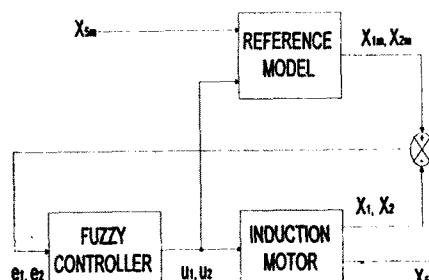


그림 1. 시스템 블록도

그림1에서 첨자 m은 기준모델의 상태변수를 나타낸다. 실제 유도전동기와 기준모델의 입력전압이 같으므로 양쪽의 출력전류를 일치시키면 전동기의 속도 x_5 는 지령속도 x_{5m} 과 동일하게 된다. 따라서 아래의 조건이 성립한다.

$$e_1 = 0 \wedge e_2 = 0 \Leftrightarrow x_5 = x_{5m}$$

즉, 전동기의 속도가 지령속도를 추종하기 위해서는 전동기전류와 기준모델전류의 차이가 영이 되도록 제어하면 된다.

3. 제어 알고리즘

기준모델의 1차전류를 동기속도 회전좌표계로 좌표변환하면 식(1)과 같다

$$\begin{bmatrix} i_{0m} \\ i_{2m} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \sin \varphi_m & \cos \varphi_m \\ \cos \varphi_m & -\sin \varphi_m \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_{1m} \\ x_{2m} \end{bmatrix} \quad (1)$$

식(1)에서 φ_m 은 모델자속벡터의 각도이고 i_{0m} 은 여자전류, i_{2m} 은 토오크전류이다. 유도전동기의 1차전류를 좌표변환하면 식(2)와 같다.

$$\begin{bmatrix} i_0 \\ i_1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \sin \varphi_m & \cos \varphi_m \\ \cos \varphi_m & -\sin \varphi_m \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \end{bmatrix} \quad (2)$$

식(1), (2)에서 동기속도 회전좌표계에 대한 전류오차는 식(3)과 같다.

$$\begin{bmatrix} e_0 \\ e_1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} i_0 - i_{0m} \\ i_1 - i_{2m} \end{bmatrix} \quad (3)$$

$$= \begin{bmatrix} \sin \varphi_m & \cos \varphi_m \\ \cos \varphi_m & -\sin \varphi_m \end{bmatrix} \begin{bmatrix} e_1 \\ e_2 \end{bmatrix}$$

식(3)의 오차벡터를 영으로 제어하기 위해 전동기의 입력전압을 식(4)로 결정한다.

$$\begin{bmatrix} u_1 \\ u_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \sin \varphi_m & \cos \varphi_m \\ \cos \varphi_m & -\sin \varphi_m \end{bmatrix} \begin{bmatrix} u_0 \\ u_1 \end{bmatrix} \quad (4)$$

$$= \begin{bmatrix} \sin \varphi_m & \cos \varphi_m \\ \cos \varphi_m & -\sin \varphi_m \end{bmatrix} \left[K_0 \int e_0 dt + K_r \int (i_{0ref} - i_{0m}) dt \right]$$

$$K_p e_1 + K_t \int e_1 dt$$

식(4)에서 i_{0ref} 는 여자전류 설정치이고 $K_r \int (i_{0ref} - i_{0m}) dt$ 는 여자전류를 일정하게 유지하기 위하여 삽입된 항이다. u_0, u_1 는 여자전류 및 토오크전류를 위한 입력전압이다. 그러나, 식(4)에 의한 제어는 전동기 전류값의 측정오차나 부하변화시 불안정할 수 있으므로 이들 의란에 강인한 시스템을 구성하기 위해 퍼지제어 알고리즘을 적용하여 u_0 및 u_1 를 구하였다. 퍼지제어를 위해 오차 및 출력범위를 고려하여 변수들을 표1과 같이 등급화하였다.

$$A = \int e_0 dt + \int (i_{0ref} - i_{0m}) dt$$

$$B = e_1$$

$$C = \int e_1 dt$$

또한, 퍼지제어규칙을 적용하여 표2 및 표3과 같이 결정표(lookup table)를 만들었다.

표1. 상태변수의 등급

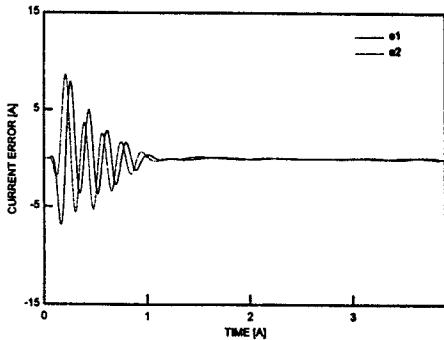
등급	A	B	C	u_0	u_t 0~10r/s	u_t 0~20r/s
-6	-3.0이하	-4.0이하	-5.0이하	-13	-30	-60
-5	-3.0~-2.5	-4.0~-3.0	-5.0~-4.0	-12.5	-25	-50
-4	-2.5~-2.0	-3.0~-2.0	-4.0~-3.0	-10	-20	-40
-3	-2.0~-1.5	-2.0~-1.0	-3.0~-2.0	-7.5	-15	-30
-2	-1.5~-1.0	-1.0~-0.5	-2.0~-1.0	-5	-10	-20
-1	-1.0~-0.5	-0.5~-0.1	-1.0~-0.3	-2.5	-5	-10
0	-0.5~0.5	-0.1~0.1	-0.3~0.3	0	0	0
1	0.5~1	0.1~0.5	0.3~1.0	2.5	5	10
2	1~1.5	0.5~1.0	1.0~2.0	5	10	20
3	1.5~2.0	1.0~2.0	2.0~3.0	7.5	15	30
4	2.0~2.5	2.0~3.0	3.0~4.0	10	20	40
5	2.5~3.0	3.0~4.0	4.0~5.0	12.5	25	50
6	3.0이상	4.0이상	5.0이상	13	30	60

표2. u_0 의 결정표

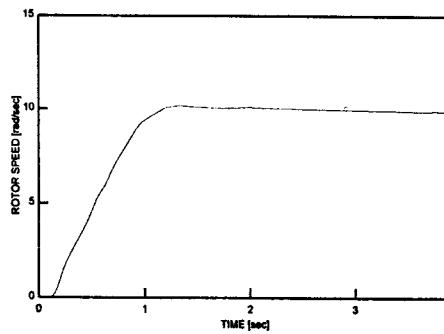
A	u_0
-6	-6
-5	-5
-4	-4
-3	-3
-2	-2
-1	-1
0	0
1	1
2	2
3	3
4	4
5	5
6	6

표3. u_t 의 결정표

C B	-6	-5	-4	-3	-2	-1	0	1	2	3	4	5	6
-6	-6	-5	-5	-5	-5	-4	-4	-4	-4	-4	-4	-4	-4
-5	-6	-5	-5	-5	-4	-4	-4	-4	-4	-4	-4	-3	-3
-4	-5	-5	-5	-4	-4	-4	-4	-4	-3	-3	-3	-3	-3
-3	-4	-4	-4	-4	-4	-4	-3	-3	-3	-3	-3	-3	-3
-2	-3	-3	-3	-3	-3	-3	-2	-2	-2	-2	-2	-2	-2
-1	-2	-2	-2	-2	-2	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1
0	-1	-1	-1	-1	-1	0	0	0	1	1	1	1	1
1	1	1	1	1	1	1	1	2	2	2	2	2	2
2	2	2	2	2	2	2	2	3	3	3	3	3	3
3	3	3	3	3	3	3	3	4	4	4	4	4	4
4	3	3	3	3	3	4	4	4	4	4	4	5	5
5	3	3	3	4	4	4	4	4	4	4	5	5	6
6	4	4	4	4	4	4	4	4	5	5	5	6	6



(a) d축, q축 전류오차



(b) 속도 응답

그림 2 지령속도 10 rad/sec에서 전류오차 및 속도응답

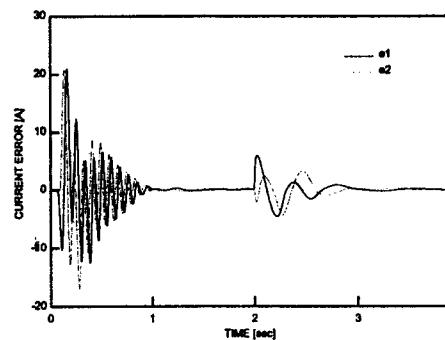
4. 시뮬레이션

시뮬레이션하고자 하는 전동기의 파라메타는 표4와 같다.

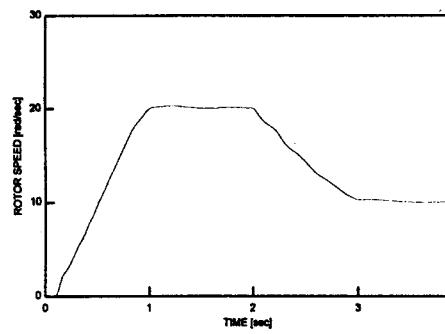
표4. 전동기 상수

일차권선저항 R_1	0.2417[Ω]
일차권선인덕턴스 L_1	40[mH]
이차권선저항 R_2	0.2489[Ω]
이차권선인덕턴스 L_2	40[mH]
상호인덕턴스 M	38[mH]
관성모멘트 J	1[Nms 2]

그림2, 3은 본 연구에서 제시된 알고리즘을 적용하여 시뮬레이션 한결과를 보여주고 있다. 그림2(a)는 지령속도를 10rad/sec로 하고 초기에 무부하, 2초후에 10N의 부하를 인가했을 때의 전동기전류와 기준모델전류의 오차를 나타낸다. 그림2(b)는 이 경우의 속도응답특성을 나타낸다. 그림3은 초기에 지령속도를 20rad/sec로 하고 2초후에 10rad/sec로 한 경우의 전류오차 및 속도응답특성을 나타낸다.



(a) d축, q축 전류오차



(b) 속도 응답

그림 3. 지령속도 20rad/sec \rightarrow 10rad/sec에서 전류오차 및 속도응답

5. 결론

본 연구에서는 위치 및 속도검출없는 유도전동기의 속도제어방법으로써 모델기준제어를 기반으로하는 퍼지제어기를 도입한 센서리스 속도제어 알고리즘을 제안하였다. 이 방식은 실제 유도전동기와 기준모델전류의 차이를 억제함으로써 전동기의 속도가 지령속도를 추종하도록 하는 것이다. 제어량은 시스템의 강인성이 유지되도록 설계한 퍼지제어기를 이용하여 산출하였으며 제시된 알고리즘을 적용하여 시뮬레이션 한 결과 양호한 속도응답 및 동적특성을 얻을 수 있었다.

참고문헌

- [1] T. Ohtani, N. Takada, and K. Tanaka, "Vector Control of Induction Motors without Shaft Encoder", *IEEE Trans. Ind. Appl.* IA-28, 1, pp157-164, 1992
- [2] A. Fratta, A. Vagati, and F. Villata, "Vector Control of Induction Motors without Shaft Transducers", *Conf. IEEE, PESC*, pp839-846, 1988
- [3] O. Vichai and M. Nagano, "Nonlinear Controller for Speed Control of Induction Motors without Speed Sensor", *SICE*, pp685-686, 1995