

유도전동기의 강인 제어를 위한 뉴로-퍼지 설계

Design of neuro-fuzzy for robust control of induction motor

송윤재, 강두영, 김형권, 안태천
원광대학교 전자·전자 및 정보공학부

Yun Jae Song, Doo Young Kang, Hyoung Gwon young Kim and Tae Chon Ahn
Electrical Electronic and Information Engineering, Wonkwang University

email: tcahn@wonkwang.ac.kr

Abstract: In this paper, control method proposed for effective speed control of the induction motor indirect vector control. For the induction motor drive, indirect vector control scheme that controls torque current and flux current of the stator current independently so that it can have improved dynamics. Also, neuro-fuzzy algorithm employed for torque current control in order to optimal speed control. The proposed neuro-fuzzy algorithm can be applied to the precise speed control of an induction motor drive system or the field of any other power systems.

Keywords: Neuro-fuzzy, Induction motor, Speed control, Robust control

I. 서 론

본 논문에서는 유도전동기를 효율적으로 제어하기 위해서 동특성이 우수하도록 고정자 전류를 토크성분 전류와 자속성분 전류로 분류하여 독립적으로 제어하는 벡터제어 기법을 도입하며, 속도를 최적 제어하기 위해 지능형 알고리즘인 뉴로-퍼지 알고리즘을 이용한 속도제어기를 설계하여 속도를 제어하고, 동기회전 좌표계의 PID 제어기에 의한 전류를 제어한다. 제안한 방법을 검증하기 위하여 PID에 의한 속도제어기와 Fuzzy-PID 속도제어기에 비해 시뮬레이션 결과 제안된 지능형 알고리즘인 Neuro-Fuzzy 알고리즘에 의해 설계된 제어기의 성능이 우수한 성능을 나타냄을 입증한다.

II. 3상 유도전동기 이론적 고찰

3상 유도전동기의 고정자 권선이 대칭이고 분포권이 라고 가정하면, 정좌표계에서의 전압방정식은 식(2-1)과 같다.

$$v_{abc} = R_{abc} i_{abc} + p\lambda_{abc} \quad (2-1)$$

여기서, p 는 미분연산자 그리고 $f_{abc} = [f_{as} f_{bs} f_{cs}]^T$ 이다.

시변계수를 소거하기 위하여 3상→2상 변환인 $d-q$ 변환을 하여 유도전동기의 모델을 얻게되며, 시변계수가 소거되고 변수들은 d 축과 q 축의 직교좌표 값으로 표현된다.

$d-q$ 변환을 위해서 변환행렬 S_{qd} 를 도입한다.

$$S_{qd} = \frac{2}{3} \begin{bmatrix} \cos(\omega t) & \cos(\omega t - \frac{2\pi}{3}) & \cos(\omega t + \frac{2\pi}{3}) \\ \sin(\omega t) & \sin(\omega t - \frac{2\pi}{3}) & \sin(\omega t + \frac{2\pi}{3}) \\ \frac{1}{2} & \frac{1}{2} & \frac{1}{2} \end{bmatrix} \quad (2-2)$$

여기서, ω 는 두 좌표계사이의 상대 각속도이다.

식(2-2)에 의해 $a-b-c$ 축과 $d-q$ 축은 식(2-3)과 같은 관계가 성립된다.

$$v_{qd} = S_{qd} \cdot v_{abc} \quad (2-3)$$

여기서, $v_{qd} = [v_d \ v_q]^T$ 로 표시된다.

식(2-3)에 의해 식(2-1)은 식(2-4)과 같게 된다.

$$S_{qd}^{-1} v_{qd} = R_s S_{qd}^{-1} i_{qd} + p S_{qd}^{-1} \lambda_{qd} \quad (2-4)$$

식(2-4)에 의해 동기 회전좌표계에서 $d-q$ 전압방정식은 식(2-5)~(2-8)과 같이 나타낼 수 있다.

$$v_{qs} = R_s i_{qs} + \omega_e \lambda_{ds} + p\lambda_{qs} \quad (2-5)$$

$$v_{ds} = R_s i_{ds} - \omega_e \lambda_{qs} + p\lambda_{ds} \quad (2-6)$$

$$v_{qr} = R_r i_{qr} + (\omega_e - \omega_r) \lambda_{dr} + p\lambda_{qr} \quad (2-7)$$

$$v_{dr} = R_r i_{dr} - (\omega_e - \omega_r) \lambda_{qr} + p\lambda_{dr} \quad (2-8)$$

여기서, ω_e 와 ω_r 는 각각 동기 회전 각속도와 회전자 전기 각속도이며, $\omega_e - \omega_r$ 은 고정자측과 회전자측의 슬립 각속도 ω_{sl} 이다. 고정자와 회전자의 쇄교자속은 식(2-9)~(2-12)과 같다.

$$\lambda_{qs} = L_s i_{qs} + L_m (i_{qs} + i_{qr}) = L_s i_{qs} + L_m i_{qr} \quad (2-9)$$

$$\lambda_{ds} = L_s i_{ds} + L_m (i_{ds} + i_{dr}) = L_s i_{ds} + L_m i_{dr} \quad (2-10)$$

$$\lambda_{qr} = L_r i_{qr} + L_m (i_{qs} + i_{qr}) = L_r i_{qr} + L_m i_{qs} \quad (2-11)$$

$$\lambda_{dr} = L_r i_{dr} + L_m (i_{ds} + i_{dr}) = L_r i_{dr} + L_m i_{ds} \quad (2-12)$$

III. 뉴로-퍼지 제어기의 설계

본 연구에서는 플랜트로부터 입력변수를 받기 위한 입력 층, 입력변수의 각 퍼지집합에 대한 소속함수를 계산하는 첫 번째 은닉층인 계층 1, 퍼지규칙의 전건부 If 부분의 조건을 계산하는 두 번째 은닉층인 계층 2, 상태 평가형 제어규칙의 추론연산을 수행하는 은닉층들인 계층 3, 4와 출력값을 계산하는 출력 층으로 구성되는 뉴로-퍼지 네트워크의 구조를 결정하였다. 2개의 입력 변수(속도오차, 오차의 변화율)와 1개의 출력 변수(토크성분 전류)를 가지므로 입력 층과 출력 층은 각각 2개와 1개의 뉴런으로 구성된다.

각 계층의 뉴런 수는 표 3-1과 같고, 제어규칙은 식(3-1)과 같다.

표 3-1. 각 계층의 뉴런 수

	입력층	계층1	계층2	계층3	계층4	출력층
뉴런 수	언어변수 (3개)	2	6	9	9	1
	언어변수 (5개)	2	10	25	25	1

If x_1 is A_1 and x_2 is B_1 then $f = P_1x_1 + Q_1x_2 + R_1$
 If x_1 is A_2 and x_2 is B_2 then $f = P_2x_1 + Q_2x_2 + R_2$
 \vdots
 If x_1 is A_m and x_2 is B_m then $f = P_mx_1 + Q_mx_2 + R_m$ (3-1)

그림 3-1은 뉴로-퍼지 네트워크의 구조로서 표 3-1과 같은 구조를 가지며, 각 계층의 기능은 다음과 같이 설명할 수 있다.

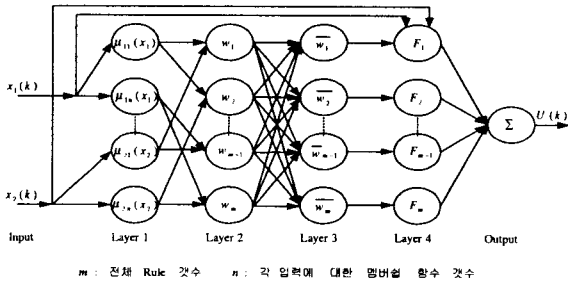


그림 3-1. 뉴로-퍼지 네트워크의 구조

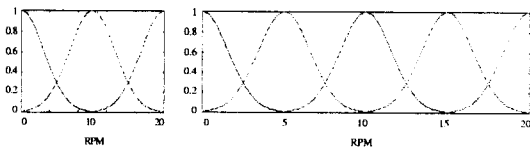
입력 층은 입력 $x_1(k)$ 과 $x_2(k)$ 의 전달기능을 한다. Layer 1은 입력 $x_1(k)$ 과 $x_2(k)$ 에 대하여 전건부 퍼지 집합 A_m 와 B_m 의 소속함수 $\mu_{1n}(x_1)$ 과 $\mu_{2n}(x_2)$ 를 계산하기 위하여, 각각 뉴런들은 식(3-2)와 같은 활성화 함수를 가진다.

$$\mu_{1n}(x_1) = \exp\left(-\frac{(x_1 - b_{1n})^2}{2a_{1n}}\right)$$

$$\mu_{2n}(x_2) = \exp\left(-\frac{(x_2 - b_{2n})^2}{2a_{2n}}\right)$$

(3-2)

Layer 1의 각 뉴런에 의하여 각 퍼지 집합에 대한 소속함수가 계산된다.



(a) 3개의 퍼지변수 (b) 5개의 퍼지변수
 그림 3-2. 소속함수

Layer 2는 퍼지제어 규칙의 If 부분의 연산을 수행하여, Layer 1의 각 뉴런들의 출력을 조합하여 전건부 조건을 구성하게 된다. Layer 2의 뉴런은 식(3-3)과 같이 입력된 두 신호를 곱하여 출력하므로, 퍼지논리의 min연산을 수행하며, 각 규칙들의 활성화강도(firing strength) 또는 가중치(weight) w_m 를 출력하게 된다.

$$w_m = \mu_{1n}(x_1)\mu_{2n}(x_2)$$

(3-3)

Layer 3은 전체 규칙의 활성화강도의 합에 대한 각 규칙의 활성화강도의 비율을 계산하여, 각 규칙의 정규화 활성화강도(normalized firing strength) \overline{w}_m 을 출력하며, 식(3-4)의 기능을 갖는 뉴런들로 구성되어 있다.

$$\overline{w}_m = \frac{w_m}{\sum_{i=1}^m w_i}$$

(3-4)

Layer 4는 해당 규칙의 후건부를 구성하며, 각 뉴런들은 식(3-5)와 같은 함수기능을 갖는다.

$$F_m = \overline{w}_m(P_mx_1 + Q_mx_2 + R_m)$$

(3-5)

식(3-5)에서 P_m, Q_m, R_m 는 상태평가형 제어규칙의 후건부 파라미터(consequent parameter)들로서 시스템의 오차가 감소하는 방향으로 학습에 의해 조정된다. 출력 층은 식(3-6)과 같이 입력되는 값들을 합하여 퍼지제어기의 출력을 만들어 준다.

$$U(k) = \sum_{i=1}^m F_i$$

(3-6)

식(3-2)~식(3-6)에서 m 입력 $x_1(k)$ 과 $x_2(k)$ 에 대한 전건부 언어변수의 수이다.

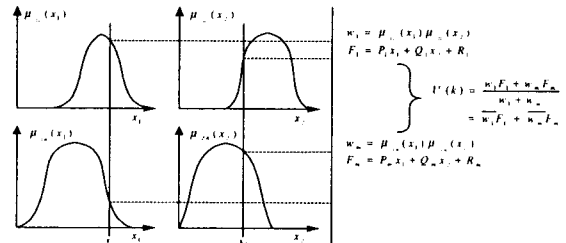


그림 3-3. 제어규칙의 추론방법

그림 3-3은 제어규칙의 추론방법을 나타낸 것이다. 추론방법의 연산과 무게중심법의 비퍼지화 연산을 수행하게 된다. 따라서, 뉴로-퍼지 네트워크는 퍼지제어기와 동일한 성능을 가지게 되며, 퍼지논리적 구조와 신경회로망 학습능력을 융합한 구조가 된다.

IV. 실험결과 및 고찰

1. 뉴로-퍼지 제어기의 파라미터

설계된 뉴로-퍼지 제어기의 전건부와 후건부의 파라미터를 학습에 따른 결과를 Look-up 테이블로 만들어 3상 유도전동기의 제어에 사용하였다.

학습은 전체 10 단계를 진행하여 전체 학습 횟수는 1000회였으며, 전건부 언어변수가 5개일 때의 학습에 따른 각각의 전건부 및 후건부 파라미터의 값들은 표 4-1과 같이 그리고 전건부 언어변수가 3개일 때의 학습에 따른 각각의 전건부 및 후건부 파라미터의 값들은 표 4-2과 같이 구해진다.

표 4-1. 언어변수가 5개일 때의 파라미터
 (a) 전건부 파라미터

n	1	2	3	4	5
a_{1n}	13.452	16.384	9.572	10.268	18.354
b_{1n}	-12.684	5.713	-3.582	14.513	6.832
a_{2n}	9.289	13.486	8.352	15.643	7.648
b_{2n}	10.359	-11.241	8.962	-5.643	17.562

(b) 후건부 파라미터

m	1	2	3	4	5	
P_m	$m=1$	2.521	6.256	0.394	-2.845	-2.031
	$m=2$	1.250	-1.022	3.332	-8.104	3.130
	$m=3$	-5.028	4.223	-7.258	-0.236	5.482
	$m=4$	1.135	-4.589	-3.544	8.201	0.157
	$m=5$	0.420	5.620	-4.145	7.360	-1.348
Q_m	$m=1$	2.301	5.341	6.014	-7.610	8.160
	$m=2$	-4.25	0.312	5.624	-2.646	0.624
	$m=3$	2.895	7.150	6.001	-7.543	-6.173
	$m=4$	1.248	4.130	-5.038	-1.248	2.357
	$m=5$	-0.325	-8.654	0.368	-5.941	0.256
R_m	$m=1$	1.358	4.981	5.624	-3.664	1.251
	$m=2$	8.568	-5.489	-4.682	3.209	-0.248
	$m=3$	-4.036	2.549	0.894	-7.540	6.485
	$m=4$	2.598	7.325	1.025	2.359	-5.267
	$m=5$	2.549	-4.582	-6.023	7.305	-4.600

표 4-2. 언어변수가 3개일 때의 파라미터
(a) 전건부 파라미터

n	1	2	3
a_{1n}	11.259	15.394	18.653
b_{1n}	15.394	12.843	-13.592
a_{2n}	12.843	9.593	17.653
b_{2n}	-15.846	5.843	18.592

(b) 후건부 파라미터

m	1	2	3	
P_m	$m=1$	6.842	-4.957	8.401
	$m=2$	-9.325	1.296	5.684
	$m=3$	9.256	-10.952	-5.620
Q_m	$m=1$	-6.359	7.268	-8.269
	$m=2$	3.259	-4.258	-9.527
	$m=3$	-3.028	-8.710	-6.592
R_m	$m=1$	-8.263	4.215	-1.028
	$m=2$	6.251	4.092	-7.266
	$m=3$	2.449	6.229	7.250

2. 시뮬레이션

제안한 알고리즘의 성능을 고찰하기 위하여 유도전동기를 구동하였으며, 실험에 사용된 유도전동기의 정격을 표 4-3에 나타내었다.[10]

표 4-3. 전동기 파라미터

Rated Speed	2800 [RPM]	L_b [mH]	0.8
Rated Voltage	230 [V]	L_s [mH]	0.8
R_s [Ω]	0.228	J [Kgm^2]	3.5×10^{-4}
R_r [Ω]	0.087	B_m [kgm^2]	1.464
L_m [mH]	34.7	Load[kg]	1

그림 4-1과 같이 유도전동기 제어 시스템에 지능형 뉴로-퍼지 알고리즘을 적용한 제어구성 시스템을 나타내었다.

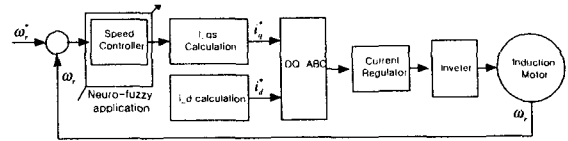


그림 4-1. 뉴로-퍼지 적용 제어시스템 구성도

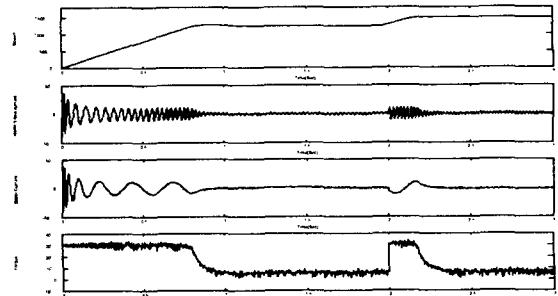


그림 4-4. PID 속도제어기를 이용한 시뮬레이션
(가변속도, 부하시)

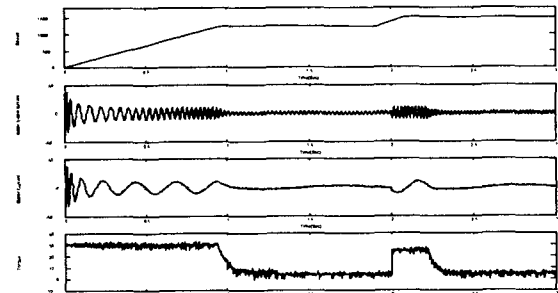


그림 4-7. Fuzzy-PID 속도제어기를 이용한
시뮬레이션 (가변속도, 부하시)

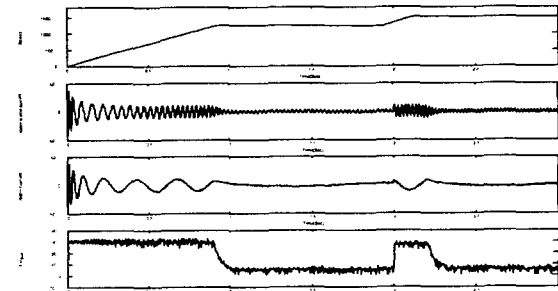


그림 4-10. Neuro-fuzzy 속도제어기를 이용한
시뮬레이션 (언어변수 3개, 가변속도, 부하시)

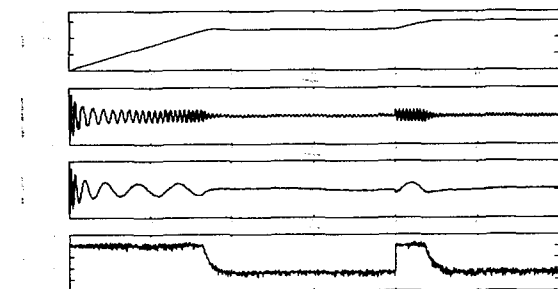


그림 4-13. Neuro-fuzzy 속도제어기를 이용한
시뮬레이션 (언어변수 5개, 가변속도, 부하시)

3. 시뮬레이션 결과 고찰

표 4-3에서 주어진 파라미터를 가진 유도전동기의 성능을 토크성능 전류와 모터 속도의 관점에서 비교하면 표 4-4와 4-5를 얻을 수 있다.

표 4-4. 토크성분 전류의 특성

Control Method i_{qs}		PID	Fuzzy-PID	Neuro-fuzzy(3)	Neuro-fuzzy(5)
		No Load	Max 2.54	2.30	2.34
Load	Min	-2.55	-2.39	-2.39	-1.62
	Max	4.80	4.57	4.11	3.23
Load	Min	-4.53	-4.35	-4.21	-3.86

표 4-5. 모터속도 특성

Control Method		PID	Fuzzy-PID	Neuro-fuzzy(3)	Neuro-fuzzy(5)
No Load	Speed Property				
	지연시간(s)	0.392	0.378	0.354	0.340
	상승시간(s)	0.626	0.602	0.580	0.640
	정정시간(s)	0.792	0.768	0.738	0.718
Load	최대 오버슈트	3.02	30.47	30.37	80.02
	지연시간(s)	0.488	0.464	0.444	0.408
	상승시간(s)	0.786	0.744	0.712	0.652
	정정시간(s)	0.994	0.942	0.906	0.830
Load	최대 오버슈트	10.33	10.14	10.12	30.78

각각의 제어기들의 속도에 따른 성능을 평가하기 위하여 ITAE(Integral of Time multiplied by the Absolute value of Error)방법을 사용하였다.

$$ITAE = \int_0^{\infty} t |e| dt \quad (4-1)$$

ITAE 평가함수에 따른 각각의 제어기에 대한 성능지표는 다음의 표 4-6와 같다.

표 4-6. 각 제어기의 성능지수

	성능지수(ITAE)			
	PID	Fuzzy-PID	Neuro-fuzzy(3)	Neuro-fuzzy(5)
No Load	25.30	23.63	22.14	21.41
Load	30.17	26.87	25.71	23.90

표 4-6의 성능지수에서 알 수 있듯이 부하가 없을 경우 5개의 전반부 언어변수를 사용한 제어기가 가장 우수한 성능을 나타냈음을 볼 수 있으며, 3개의 전반부 언어변수를 사용한 제어기도 비슷한 성능을 나타낸다. 부하가 있을 경우에는 5개의 전반부 언어변수를 사용한 제어기가 가장 우수한 성능을 나타남을 볼 수 있다.

V. 결 론

본 논문에서는 지능형 알고리즘인 뉴로-퍼지에 의해 3개와 5개의 전반부 언어변수를 가지는 뉴로-퍼지 속도제어기를 설계하였으며, 시뮬레이션을 통해 일반적으로 사용되는 PID, Fuzzy-PID 제어기들과 비교하였

다. 또한 부하가 있을 때와 없을 때의 성능을 비교하기 위하여 1Kg의 선형부하를 사용하여 유도전동기의 성능을 비교하였다. 시뮬레이션 및 특성 분석과 성능지수의 내용을 바탕으로 하여 전체적인 성능을 비교한 결과 다음과 같은 결과를 얻을 수 있다.

- 1) 부하가 없을 경우 전전부 언어변수가 3개인 뉴로-퍼지 제어기가 우수한 성능을 나타냈으나, 부하가 있을 경우에는 전전부 언어변수가 5개인 뉴로-퍼지 제어기가 전전부 언어변수가 3개인 뉴로-퍼지 제어기에 비해 오버슈트가 크고 전체적인 성능에서 다소 우수한 성능을 보이지 못하고 있다.
- 2) 뉴로-퍼지 제어기의 전전부 및 후전부의 파라미터를 Look-up 테이블로 만들어 사용함으로써 뉴로-퍼지 제어기의 적용함으로써 유도전동기의 속도제어를 할 수 있으며, 우수한 성능을 나타낼 수 있다.

[참고문헌]

- [1] S. B. Dewan and A. Straughen, "Power semiconductor circuits", Toronto, Canada Mar, 1975.
- [2] F. Blaschke, "The principle of field orientation as applied to the new transvector closed loop control system for rotating field machines", Siemens Review, Vol. 34, pp. 217~221, 1972.
- [3] Chin Teng Lin and C.S. George Lee, "Neural fuzzy systems" Prentice Hall International, Inc. 1996
- [4] Y. Kinpara, M. Koyama, "Speed sensorless vector control method of induction motor including a low speed region", Trans. of the Inst. of Electrical Engineers of Japan D - A Publication of Industry Applications Society, Vol.120-D, 223~229, 2000
- [5] C. Y. Huang, T. C. Chen, C. L. Huang, "A microcomputer-based induction motor drive system using current and torque control", IEEE Transactions on Energy Conversion, Vol. 14, pp. 874~880, 1999.
- [6] B. K. Bose, "Power electronics and AC drivers", Prentice-Hall, 1986.
- [7] P. C. Krause, "Analysis of electric machinery", McGraw-Hill Book, 1987.
- [8] M. Ouhrouche, "Vector control of an induction motor with on-line rotor resistance identification ", Proc. of the 1999 IEEE Canadian Conf. on Elec. and Computer Eng., Vol. 2 , pp. 1121~1125 , 1999.
- [9] G. Minas, J. S. Martins, C. Couto, "A microcontroller based voltage space vector modulator suitable for induction motor drives", Proc. of the IEEE International Symp. on Industrial Electronics, Vol. 2, pp. 469~473, 1999.
- [10] Chee-Mun Ong, "Dynamic simulation of electric machinery" Prentice hall PTR 1988.
- [11] Peter Vas, "Electrical machines and drives" Oxford science publications 1992.
- [12] J. Holtz, "Pulsewidth modulation a survey", Conf. Rec. of IEEE PESC, pp. 11~18, 1992.