

ANFIS Controller를 이용한 유도전동기 벡터제어 시스템

이학주
한전 전력연구원 배전연구소

Vector Control System for Induction Motor using ANFIS Controller

Lee Hak Ju
Korea Electric Power Research Institute (KEPRI)

Abstract - This paper deals with mathematical of an induction motor, considering non-linearity in the torque balance equation under closed loop operation with a reference speed. A controller based on Adaptive Nuro-Fuzzy Inference System (ANFIS) is developed to minimize overshoot and settling time following sudden changes in load torque. The overall system is modeled and simulated using the Matlab/Simulink and Fuzzy Logic Toolbox. The advantages of fuzzy logic and neural network based fuzzy logic controller. Required training data the ANFIS controller is generated by simulation of the anti-windup PI controller is eliminated using the ANFIS controller. The transient deviation of the response from the set reference following variation in load torque is found to be negligibly small along with a desirable reduction in settling time for the ANFIS controller.

1. 서 론

유도전동기를 직류전동기와 같이 속도를 제어하기 위해 자속과 토크를 분리하여 제어하는 자속기준제어 또는 벡터제어에 대한 연구가 활발하게 진행되어 오고 있지만 이는 복잡한 알고리즘을 필요로 한다. 또한 유도전동기 벡터제어 시스템은 제어알고리즘이 간단하고 구현이 용이한 PI제어기를 일반적으로 적용한다. 그러나 유도전동기의 비선형 특성으로 인해 선형 PI 제어기는 운전조건의 변동, 파라미터의 변동에 따른 최적의 운전 상태를 유지하기 위해서는 제어이득을 동조하여야 한다. 이러한 문제를 극복하기 위하여 지능제어 및 적응제어에 대한 연구가 활발하게 진행되어 오고 있다. 적응제어는 제어 환경변화에 대한 대응은 가능하지만 제어 알고리즘이 복잡하여 많은 계산으로 연산시간이 길어지고 적응시간이 느려 시정수가 작은 시스템에의 적용에 어려움이 있다. 이에 본 논문에서는 유도전동기를 효율적으로 제어하기 위하여 벡터제어기법을 도입하고 최적의 속도제어기를 설계하기 위해 뉴로-퍼지 알고리즘을 이용한 속도제어기를 설계, 동기회전 좌표계의 PI제어기로 전류를 제어한다. 제안한 방법의 우수성을 검증하기 위하여 Neuro-Fuzzy알고리즘에 의해 설계된 ANFIS 속도제어기를 PI속도 제어기와 비교하였다.

2. 본 론

2.1 유도전동기 벡터제어 시스템

고정자 직교좌표계의 전압과 전류는 모두 교류이고 각주파수 ω_e 로 회전하는 교류량을 직류로 해석하기 위해서 좌표축이 ω_e 로 회전하는 동기좌표계를 도입하여 d-q축으로 표현된 등가회로의 고정자, 회전자 전압방정식은 식(1)과 같이 표현할 수 있다.

$$\begin{aligned} V_{ds}^e &= R_s i_{ds}^e + p \lambda_{ds}^e - \omega_e \lambda_{qs}^e \\ V_{qs}^e &= R_s i_{qs}^e + p \lambda_{qs}^e + \omega_e \lambda_{ds}^e \\ V_{dr}^e &= R_r i_{dr}^e + p \lambda_{dr}^e - (\omega_e - \omega_r) \lambda_{qr}^e \\ V_{qr}^e &= R_r i_{qr}^e + p \lambda_{qr}^e + (\omega_e - \omega_r) \lambda_{dr}^e \end{aligned} \quad (1)$$

또한, 동기 회전좌표계에서의 d-q축 회전자 쇄교자속에 대한 상호인덕턴스(L_m), 고정자 및 회전자 자기인덕턴스(L_s, L_r)의 관계는 식(2)와 같다.

$$\begin{aligned} \lambda_{ds}^e &= L_s \cdot i_{ds}^e + L_m \cdot i_{dr}^e \\ \lambda_{dr}^e &= L_r \cdot i_{dr}^e + L_m \cdot i_{ds}^e \\ \lambda_{qs}^e &= L_s \cdot i_{qs}^e + L_m \cdot i_{qr}^e \\ \lambda_{qr}^e &= L_r \cdot i_{qr}^e + L_m \cdot i_{qs}^e \end{aligned} \quad (2)$$

이를 행렬식으로 나타내면 다음 식(3)과 같다.

$$\begin{bmatrix} V_{ds}^e \\ V_{qs}^e \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R_s + pL_s & -\omega L_s & pL_m & -\omega L_m \\ \omega L_s & R_s + pL_s & \omega L_m & pL_m \\ pL_m & -(\omega - \omega_r)L_m & R_r + pL_r & -(\omega - \omega_r)L_r \\ (\omega - \omega_r)L_m & pL_m & (\omega - \omega_r)L_r & R_r + pL_r \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{ds}^e \\ i_{qs}^e \\ i_{dr}^e \\ i_{qr}^e \end{bmatrix} \quad (3)$$

여기서 p 는 미분연산자이며, 유도전동기 회전자 전압은 단락회로로 구성되어 있어 항상 0으로 표현할 수 있다.

간접벡터제어는 간접벡터제어 방식은 토오크전류와 자속전류로부터 슬립 각속도를 계산하여 좌표변환에 필요한 단위벡터를 발생시키는 방식이다.

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

식(1)의 회전자 전압식에서 슬립속도 및 d축 자속은 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\omega_{sl} = L_m \frac{R_r}{L_r} \frac{i_{qs}^e}{\lambda_{dr}^e} \quad (5)$$

$$\lambda_{dr}^e = \frac{1}{1+p} \frac{R_r}{L_r} L_m i_{ds}^e \quad (6)$$

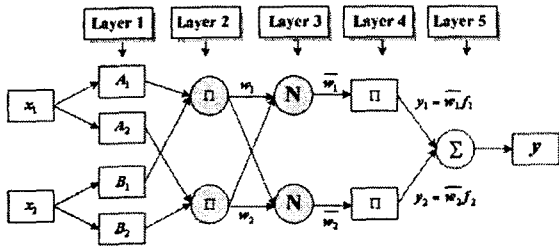
간접 벡터제어방식은 저속으로부터 고속영역까지 운전이 가능하고 시스템 구성이 간단하나 전동기의 시정수 등 파라미터 변동에 대한 영향이 큰 단점이 있다. 본 논문의 간접벡터제어 시스템은 공간전압벡터PWM인버터, 고정자좌표를 기준의 유도전동기 모델, 전류 및 속도 Anti-windup PI제어기, 자속관측기로 구성되며 Matlab/Simulink를 이용하여 <그림2>와 같이 모델링하고 시뮬레이션 하였다.

2.2 ANFIS 제어기

ANFIS는 1차 Sugeno시스템에 관한 퍼지 시스템 파라미터를 최적화시키기 위한 혼합 학습규칙을 사용하는데 이 학습규칙은 조건부 파라미터의 최적화를 위해 구배감소 알고리즘을 또, 결론부 파라미터를 풀기 위해 최소제곱법을 사용한다. 오차 감소를 위한 2개의 상이한 알고리즘을 사용하기 때문에 이 혼련 규칙을 하이브리드라 하며, 결론부 파라미터는 최소제곱 알고리즘에 의해 먼저 갱신되고, 조건부 파라미터는 오차를 역전파 시키는 방식으로 갱신된다. 본 논문에서 제어기 설계는 플랜트에서 입력변수를 입력받기 위한 입력층, 입력변수의 각 퍼지집합에 대한 소속함수를 계산하는 첫 번째 은닉층인 계층1, 퍼지규칙의 전건부인 If부분의 조건을 계산하는 두 번째 은닉층 계층2와 상태평가형 제어규칙의 추론연산을 수행하는 은닉층 계층3,4와 출력값을 계산하는 출력층으로 구성되는 뉴로-퍼지 네트워크의 구조를 적용하였다. 속도 오차와 오차 변화율 2개의 입력변수와 토크성분 전류를 출력변수로 가지므로 2개의 입력층과 1개의 출력층 뉴런으로 구성된다.

$$\begin{aligned} \text{If } (x_1 \text{ is } A_1) \text{ and } (x_2 \text{ is } B_1) \text{ then } f_1 &= p_1 x_1 + q_1 x_2 + r_1 \\ \text{If } (x_1 \text{ is } A_2) \text{ and } (x_2 \text{ is } B_2) \text{ then } f_2 &= p_2 x_1 + q_2 x_2 + r_2 \end{aligned}$$

<그림1>은 2개의 입력과 2개의 규칙을 가지는 ANFIS 구조로 각 계층의 기능은 다음과 같다.



<그림 1> ANFIS 구조

Layer1은 입력에 대하여 전건부 퍼지집합의 소속함수 등급을 생성한다.

$$O_i^1 = \mu_{A_i}(x) \quad (7)$$

Layer2는 퍼지제어 규칙의 If부분의 연산을 수행하여, Layer1의 각 뉴런의 출력을 조합하여 전건부의 조건을 구성한다. Layer2의 뉴런은 식(8)와 같이 입력 두 신호를 곱하여 출력하므로 퍼지논리의 min연산을 수행하며 각 규칙의 활성화도를 출력하게 된다.

$$O_i^2 = w_i = \prod_{j=1}^m \mu_{A_j}(x) \quad (8)$$

Layer3은 전체 규칙의 활성화도의 합에 대한 각 규칙의 활성화도의 비율을 계산하여 각 규칙의 정규화 활성화도를 출력한다.

$$O_i^3 = \bar{w}_i = \frac{w_i}{\sum_{m=1}^m w_i} \quad (9)$$

Layer4는 해당 규칙의 후건부를 구성하며, 각 뉴런들은 다음의 식(10)과 같은 기능을 가진다. 여기서 p, q, r 은 상태평가형 제어규칙의 후건부 파라미터로 시스템의 오차가 감소하는 방향으로 학습에 의해 조정된다.

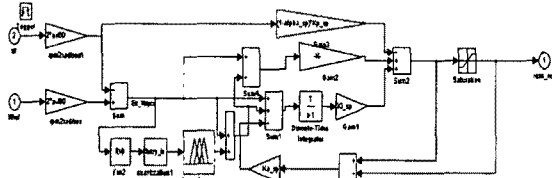
$$O_i^4 = y_i = \bar{w}_i f_i = \bar{w}_i (p_i x_1 + q_i x_2 + r_i) \quad (10)$$

출력층은 아래 식(11)과 같이 입력되는 값들을 합하여 퍼지제어기의 출력을 만들어 준다.

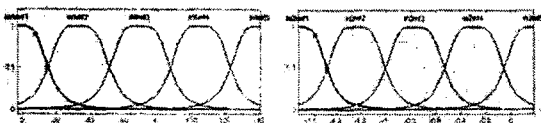
$$O_i^5 = \sum_i y_i = \sum_i \bar{w}_i f_i \quad (11)$$

2.3 Matlab을 이용한 ANFIS 제어기 설계

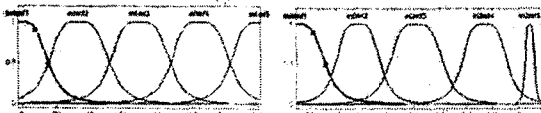
본 논문에서 제어기 설계는 플랜트에서 입력변수를 입력받기 위한 입력층, 입력변수의 각 퍼지집합에 대한 소속함수를 계산하는 첫 번째 은닉층인 계층1, 퍼지규칙의 전건부인 If부분의 조건을 계산하는 두 번째 은닉층 계층2와 상태평가형 제어규칙의 후론연산을 수행하는 은닉층 계층3,4와 출력값을 계산하는 출력층으로 구성되는 뉴로-퍼지 네트워크의 구조를 적용하였다. 속도 오차와 오차 변화율 2개의 입력변수와 토크성분 전류를 출력변수로 가지므로 2개의 입력층과 1개의 출력층 뉴런으로 구성된다. 또한 본 논문에서는 Matlab에서 제공하는 Fuzzy Logic Toolbox를 이용, 입력변수의 멤버십 함수는 5개의 퍼지 변수를 가지는 종형으로 <그림3>과 같이 시뮬레이션 하였다.



<그림 2> 제어기 구성도

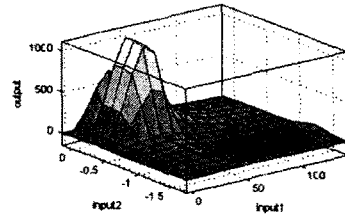


(a) 학습이후 소속함수



(b) 학습이후 소속함수

<그림 3> 멤버십 함수

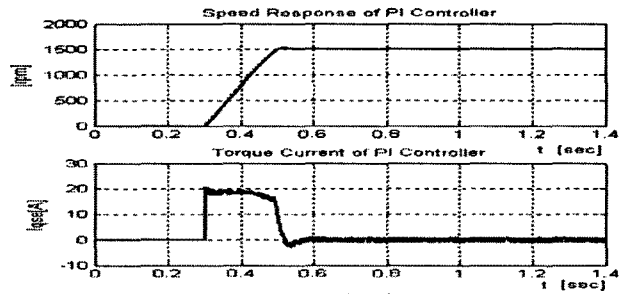


<그림 4> 제어 표면

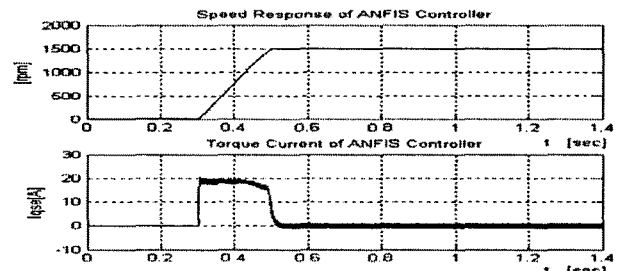
다음은 본 논문에서 설계한 ANFIS 제어기의 정보이다.

ANFIS info:	
Number of nodes:	75
Number of linear parameters:	75
Number of nonlinear parameters:	30
Total number of parameters:	105
Number of training data pairs:	97
Number of checking data pairs:	97
Number of fuzzy rules:	25

3. 시뮬레이션 결과 및 고찰



<그림 5> 속도 및 토크 전류 (PI Controller)



<그림 6> 속도 및 토크 전류 (ANFIS Controller)

본 논문에서 사용한 유도전동기의 성능을 토크성분 전류와 모터속도의 관점에서 비교하면 <표1>과 같다.

<표 1> 제어기별 특성 및 제어성능지수

	상승시간[s]	오버슈트[%]	ITAE	토크성분 전류	
				최대	최소
PI 제어기	0.479	1.93	5.56	20.6	-2.90
ANFIS제어기	0.475	0.11	5.52	20.6	-0.92

본 논문은 유도전동기 속도제어 성능향상을 위하여 5개 퍼지변수의 ANFIS 제어기를 제안한 논문으로 PI제어기보다 상승시간의 우수성은 0.002[s]로 오버슈트 및 제어기 성능지수가 우수함을 확인하였다..

[참고 문헌]

- [1] 송윤재 외 3인, "유도전동기의 강인제어를 위한 뉴로-퍼지 설계", Proceedings of KFIS Spring Conference, vol.14, no.1, pp.454-457, 2004.
- [2] Aware, M.V., "Application of adaptive neuro-fuzzy controller for voltage source inverter fed induction motor drive", Power Electronics and Motion Control Conference, vol.2, pp.935-939, 2000.8