

퍼지-신경회로망 제어기를 이용한 유도전동기의 최대토크 제어

이홍균, 남수명, 최정식, 고재섭, 정동화
 순천대학교 공과대학 정보통신공학부

MTPA Control of Induction Motor Drive using Fuzzy-Neural Networks Controller

Hong-Gyun Lee, Su-Myeong Nam, Jung-Sik Choi, Jae-Sub Ko, Dong-Hwa Chung
 School of Information & Communication Engineering, Sunchon National Univ.

ABSTRACT

In this paper, we propose fuzzy-neural network controller that combines a fuzzy control and the Neural Networks for high performance control of induction motor drive. Also, this paper is proposed control of maximum torque per ampere of induction motor. This strategy is proposed which is simple in structure and has the honest goal of minimizing the stator current magnitude for given load torque. The performance of the proposed induction motor drive with maximum torque control using fuzzy-neural network controller is verified by simulation at dynamic operation conditions.

1. 서 론

고성능 토크제어는 지령전류를 추종하는 전류제어를 위하여 빠르고 충분한 전류응답을 필요로 한다. 그러나 인버터의 DC 링크에서 전압과 전류의 한계 때문에 전동기의 입력전압 및 전류는 제한된다. 따라서 전동기에서 발생한 토크는 이러한 입력 제한조건 때문에 안전한 동작을 위하여 제한될 수 있다. 가변속 제어 시스템은 생산력을 높이기 위하여 가능한 고속으로 지령속도를 추종해야 한다. 입력 전압과 전류의 조건에서 최대토크를 발생할 수 있는 제어방식이 필요하다.[3]

최근 적응제어, 퍼지제어 및 신경회로망을 혼합한 인공지능 제어에 많은 관심을 가지고 연구가 되고 있다. 이러한 혼합제어는 플랜트의 파라미터에서 불확실성과 미지의 변동을 용이하게 처리할 수 있으며 더욱 효율적으로 취급할 수 있는 구조를 구축할 수 있다. 또한 제어 시스템의 고성능과 강인성 제어를 할 수 있는 장점 때문에 이러한 연구에 관심을 가지고 있다.[4] 본 논문에서는 퍼지-신경회로망 제어기를 이용한 유도전동기의 최대토크 제어의 특성을 분석하고 그 결과를 제시한다.

2. 유도전동기의 모델링

유도전동기 동적 방정식의 동기 기축축에서 간접 벡터제어는 $\theta_c(0)$ 의 ϕ_{dr} 가 영이 되도록 선정한다.[5]

$$0 = -\frac{R_r L_m}{L_r} i_{qs} + \omega_s \phi_{dr} \quad (1)$$

$$0 = \frac{R_r}{L_r} (\phi_{dr} - L_m i_{ds}) + p \phi_{dr} \quad (2)$$

i_{ds} 가 일정하게 유지하기 위하여 제어하면 식(2)에서 $p \phi_{dr} = 0$ 이다.

$$\phi_{dr} = L_m i_{ds} \quad (3)$$

식(1)에서 ω_s 에 대하여 풀면 다음 식과 같다.

$$\omega_s = \frac{R_r i_{qs}}{L_r i_{ds}} \quad (4)$$

토크 식도 다음 식과 같다.

$$T_e = K \frac{L_m^2}{L_r} i_{qs} i_{ds} \quad (5)$$

간접 벡터제어의 블록도는 그림 1과 같다. i_{ds}^* 는 일반적으로 일정하게 유지하는 지령 자화전류이며 i_{qs}^* 는 토크를 제어한다. 지령전류 $i_{as}^*, i_{bs}^*, i_{cs}^*$ 는 인버터 제어 시스템에 공급된다.

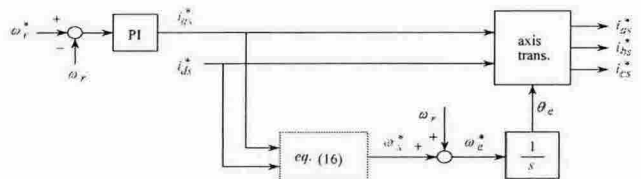


그림 1 간접 벡터제어의 블록도

고정자 전류크기는 피크 교류전류로서 정의한다.

$$|i_s| = \sqrt{i_{qs}^2 + i_{ds}^2} \quad (6)$$

고정자 자속도 전류와 유사하게 정의한다.

$$|\phi_s| = \sqrt{\phi_{qs}^2 + \phi_{ds}^2} \quad (7)$$

3. 최대토크 제어

최대토크 제어에서 동작은 주어진 토크와 속도에서 얻고 슬립 각속도는 고정자 전류를 최소화하기 위하여

조절한다. 이 동작 모드는 최대토크 제어로서 연속적으로 동작한다. 고정자 전류를 최소화하는 슬립 각속도는 식(6)이 일정한 조건을 이용하여 i_{ds} 와 i_{qs} 의 곱을 최적화하여 쉽게 설정할 수 있다. 따라서 i_{qs} 는 i_{ds} 와 함께 설정해야 하면 다음 식을 얻는다.

$$\omega_{s, \text{MTPA}} = \frac{R_r}{L_r} = \frac{1}{\tau_r} \quad (8)$$

여기서 τ_r 는 시정수이다. 이는 최소 고정자 전류를 유지하기 위하여 일정한 슬립 각속도에서 동작해야 한다. 최대 효율 및 최소 고정자 전류에서 동작은 동작조건 때문에 전 속도와 토크 영역을 위하여 성취할 수 없다. 여기서 세가지 조건을 가정한다. 1) 고정자 전류는 설정 최대치를 초과할 수 없다. 2) 고정자 자속은 설정 최대치를 초과할 수 없다. 3) 고정자 전압은 정격을 초과할 수 없다. 조건 2)를 만족하면 조건 3)은 정격보다 낮은 속도에서 자동적으로 만족한다. 이러한 제한 조건을 설정하기 위하여 고정자 전류와 자속은 선형된 독립변수에 의해 표현을 쉽게 할 수 있다.

$$|\phi_s| = \sqrt{T_e \left(\frac{a}{\omega_s} + b\omega_s \right)} < |\phi_s|_{\text{max}} \quad (9)$$

여기서

$$a = \frac{R_r [L_m^4 + L^2 L_r^2 + 2L_m^2 L L_r]}{L_r^2 L_m^2} \quad (10)$$

$$b = \frac{L^2 L_r^2}{R_r L_m^2} \quad (11)$$

$$|i_s| = \sqrt{T_e \frac{L_r}{L_m} \left(\frac{1}{\tau_r \omega_s} + \tau_r \omega_s \right)} < |i_s|_{\text{max}} \quad (12)$$

자속이 정격보다 낮으면 최대 슬립 각속도는 식(8)과 같다. 매우 큰 토크에 대하여 슬립 각속도는 자속 조건을 초과할 수 없다. 동작의 자속제한 모드에서 슬립 각속도의 표현은 식(9)에서 $|\phi_s|=1$ 로 설정하여 얻을 수 있으며 ω_s 를 구하면 다음 식과 같다.

$$\omega_s = \frac{1 - \sqrt{1 - 4T_e^2 c}}{2T_e b} \quad (13)$$

$$c = \frac{L^2 [L_m^4 + L^2 L_r^2 + 2L_m^2 L L_r]}{L_m^4} \quad (14)$$

일정 슬립과 동작의 자속 제한영역 사이에서 한계점은 식(8)에서 정의한 최대 슬립 각속도를 위하여 식(13)에서 ω_s 를 설정하여 얻는다.

$$T_{e, \text{bp}} = \frac{R_r L_r}{b L_r^2 + (c R_r)^2} \quad (15)$$

$T_e < T_{e, \text{bp}}$ 에서 필요한 각 속도는 식(8)에서 주어지고 $\tau_r \omega_s = 1$ 이다. $T_e > T_{e, \text{bp}}$ 에서 필요한 슬립 각속도는 식(13)에서 주어지고 $\tau_r \omega_s$ 는 다음 식과 같다.

$$\tau_r \omega_s = \frac{(1 - \sqrt{1 - 4T_e^2 b}) L_m^2}{2T_e L_r} \quad (16)$$

식(5)에서 i_{qs} 에 대한 식으로 변형한다.

$$i_{qs} = \frac{K_1 T_e}{i_{ds}} \quad (17)$$

여기서 $K_1 = L_r / K L_m^2$ 이다.

식(17)을 식(6)에 대입하여 정리하면 다음 식과 같다.

$$|i_s| = \sqrt{(K_1 T_e)^2 i_{ds}^{-2} + i_{ds}^2} \quad (18)$$

$|i_s|$ 가 최소가 되는 i_{ds} 를 구하기 위하여 $di_s/di_{ds} = 0$ 조건을 구한다.

$$i_{ds} = \sqrt{K_1 T_e} \quad (19)$$

4. 퍼지-신경회로망 제어기

유도전동기 드라이브의 고성능 및 강인성 제어를 위하여 동적 특성에서 다양한 속도 추정능력, 부하 변화에 적응하여 조절할 수 있는 양호한 응답특성이 요구된다. 따라서 일반적인 퍼지제어기에서는 이러한 요구에 만족할 수 없기 때문에 본 논문에서는 퍼지제어기와 신경회로망을 상호 혼합하여 퍼지-신경회로망 제어기를 구성한다.[4]

그림 2는 FNN 제어기의 구성을 나타내며 여기서 두 개의 입력변수는 오차 e 와 오차의 변화분 ce 이고 출력변수는 제어변수 u^* 이다.

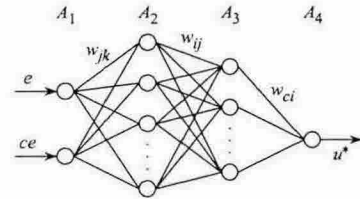


그림 2 퍼지-신경회로망 제어기의 구성

5. 시스템의 성능결과

그림 3은 FNN 및 최대토크 제어인 MTPA 제어기에 의한 유도전동기의 드라이브 시스템을 나타낸다. 지령 d 축 전류는 MTPA 제어기에 의하여 제어되며 속도는 FNN 제어기에 의해 제어된다.

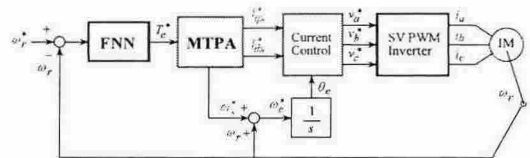


그림 3 FNN 및 MTPA 제어기에 의한 유도전동기의 드라이브 시스템

그림 4은 0.5[sec]에서 지령속도를 1800[rpm]으로 운전하였을 경우 종래의 PI 제어기와 본 논문에서 제시한 MTPA 제어기의 응답특성을 비교한다. 그림 4(a)는 지령속도와 실제속도를 나타내고 그림 (b)는 발생 토크, 그림 (c)는 d 축 전류 그리고 그림 (d)는 전류의 크기를 나타낸다. 본 논문에서 제시한 MTPA 제어기가 종래의 PI 제어기 보다 빠르게 안정화되고 오버슈트도 매우 작게 나타남

로 응답특성이 양호하다. 그리고 그림 (d)에서 MTPA 제어기는 전류의 크기도 작게 나타나므로 상대적으로 토크는 크게 된다.

그림 5은 1000[rpm]으로 정상상태로 운전을 하다가 0.6-0.9[sec]에서 3[N·m]의 부하를 인가하였을 경우에 나타나는 응답특성이다. 부하를 인가한 경우에도 MTPA의 성능은 양호하게 나타나고 있다.

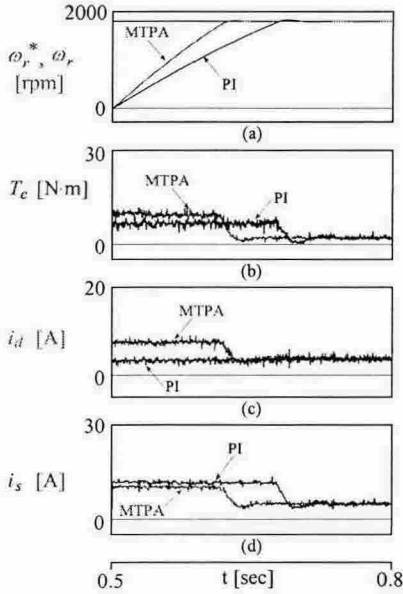


그림 4 스텝 지령속도에 의한 응답특성 비교

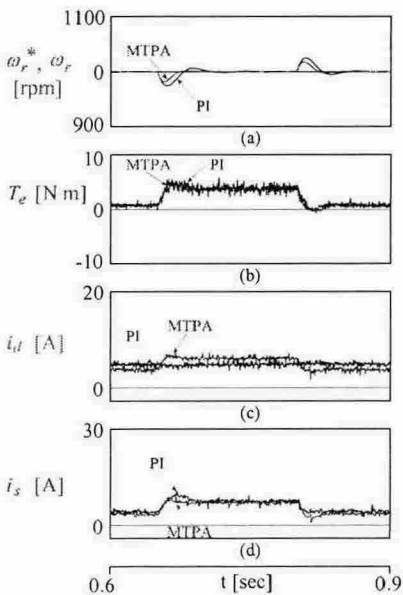


그림 5 부하토크 변동에 대한 응답특성의 비교

그림 6는 정·역회전을 시켰을 경우 나타나는 응답특성이다. 지령속도를 1000[rpm]과 -1000[rpm]으로 반복하여 정·역회전한다. MTPA 제어기가 빠르게 정상상태에 도달하고 전류의 크기가 감소되므로 토크는 증가하게 된다. 따라서 MTPA 제어기는 종래의 PI 제어기에 비해 속도 및 부하토크 등 파라미터의 변동에도 우수한 성능이 나타난다.

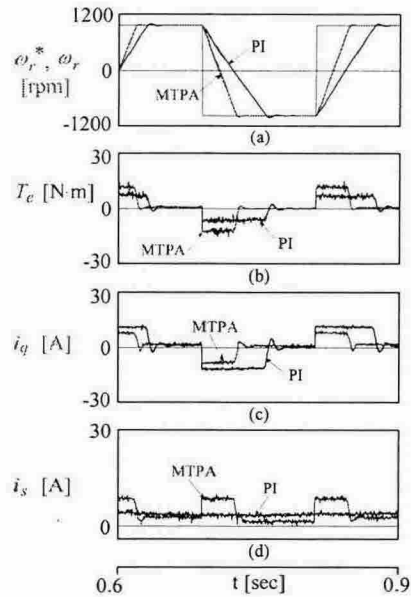


그림 6 정·역회전에서 응답특성 비교

6. 결론

본 논문은 FNN 제어기를 이용하여 유도전동기 드라이브의 최대토크 제어를 제시하였다. 정해진 속도와 토크에서 전류의 크기를 최소화하여 토크를 최대화하는 새로운 제어 방식이다. 제어기의 구조는 간단하고 파라미터의 변동에 강인성 제어가 가능하다. FNN 제어기를 적용하여 유도전동기의 최대토크를 구하였으며 정상상태, 과도상태, 속도 및 부하토크의 변화에 대한 응답특성을 비교하였다. 본 논문에서 제시한 최대토크 제어가 종래의 PI 제어기 보다 우수한 성능을 얻을 수 있으므로 본 논문의 타당성을 입증할 수 있었다.

참고문헌

- [1] J. M. D. Murphy and F. G. Turnbull, "Power electronic control of AC motors," New York: Pergamon, pp. 284-287, 1988.
- [2] X. Xu and D. W. Novotny, "Selecting the flux reference for induction machine drives in the field weakening region," IEEE Trans. IA, vol. 28, pp. 1353-1358, 1992.
- [3] H. Grotstollen and J. Wiesing, "Torque capability and control of a saturated induction motor over a wide range of flux weakening," IEEE Trans. IE, vol. 42, pp. 374-381, 1995.
- [4] D. H. Chung, J. C. Lee, H. G. Lee and S. M. Nam, "Speed control of induction motor drive using adaptive FNN controller," International Conference ICEMS'04, Conference no. PI-5(430-M0)
- [5] D. H. Chung, "Power Electronic and Motor Control," Inter vision, 2004

본 결과물은 교육인적자원부와 산업자원부의 출연금 및 보조금으로 수행한 산학협력중심대학육성사업의 연구결과입니다.