

FNN 제어기를 이용한 유도전동기 드라이브의 최대토크 제어

(Maximum Torque Control of Induction Motor Drive using FNN Controller)

김종관 · 박기태 · 정동화* · 차영두

(Jong-Gwan Kim · Gi-Tae Park · Dong-Hwa Chung · Young-Doo Cha)

요 약

본 논문에서는 퍼지와 신경회로망을 혼합한 FNN(Fuzzy Neural Network) 제어기를 이용한 유도전동기의 최대 토크 제어를 제시한다. 먼저 유도전동기 드라이브의 고성능 제어를 위하여 FNN 제어기를 설계한다. 다음은 유도전동기의 최대토크 제어를 위하여 주어진 부하토크에서 고정자 전류를 최소화하여 단위 전류당 발생토크를 높인다. 본 논문에서 제시한 FNN을 이용한 최대토크 제어의 특성을 분석하고 그 결과를 제시한다.

Abstract

The maximum output torque and power developed by the machine is ultimately depended on the allowable inverter current rating and maximum voltage which the inverter can supply to the machine. Therefore, considering the limited voltage and current capacities, it is desirable to consider a control method which yields the best possible torque per ampere.

In this paper, we propose fuzzy neural network(FNN) controller that combines a fuzzy control and the neural network for high performance control of induction motor drive. This controller composes antecedence of the fuzzy rules and consequence by a clustering method and a multi-layer neural networks. This controller is compounding of advantages that robust control of a fuzzy control and high-adaptive control of the neural networks. Also, this paper is proposed control of maximum torque per ampere(MTPA) 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 FNN controller is verified by analysis results at dynamic operation conditions.

Key Words : Induction Motor Drive, FNN, Fuzzy Control, Neural Network, Maximum Torque Control

1. 서 론

AC 서보, 견인 및 전기자동차, 스피들 드라이브 같은 다양한 적용분야에 유도전동기가 많이 사용되고 있다. 일반적으로 유도전동기의 가변속 드라이브는 부하의 변동에 무관하게 광범위한 속도동작 범위

* 주저자 : 순천대학교 정보통신공학부 교수
Tel : 061-750-3543, Fax : 061-750-3508
E-mail : hwa777@sunchon.ac.kr
접수일자 : 2005년 6월 29일
1차심사 : 2005년 7월 1일, 2차심사 : 2005년 8월 1일
심사완료 : 2005년 8월 8일

와 고속 토크응답을 필요로 한다. 벡터제어를 이용하여 고 결합, 비선형, 다변 유도전동기는 토크와 자속을 선형, 비간섭 제어를 통하여 간단하게 제어할 수 있다[1-2].

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 제한 조건 때문에 안전한 동작을 위하여 제한될 수 있다. 가변속 제어 시스템은 생산력을 높이기 위하여 가능한 고속으로 지령속도를 추종해야 한다. 입력 전압과 전류의 조건에서 최대토크를 발생시킬 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 FNN(Fuzzy Neural Network) 제어를 이용한 유도전동기의 최대토크 제어를 제시한다. 먼저 유도전동기 드라이브의 고성능 제어를 위하여 FNN 제어를 설계한다. 다음은 유도전동기의 최대토크 제어를 위하여 주어진 부하토크에서 고정자 전류를 최소화한다. 본 연구에서 제시한 FNN을 이용한 최대토크 제어의 특성을 분석하고 그 결과를 제시한다.

2. 유도전동기의 모델링

유도전동기의 동적 방정식은 동기 기준축에서 표현하면 다음 식과 같다[5].

$$v_{ds} = R_s i_{ds} + p\phi_{ds} - \omega_e \phi_{qs} \quad (1)$$

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

$$v_{dr} = R_r i_{dr} + p\phi_{dr} - \omega_s \phi_{qr} \quad (3)$$

$$v_{qr} = R_r i_{qr} + p\phi_{qr} + \omega_s \phi_{dr} \quad (4)$$

여기서 $\omega_s = \omega_e - \omega_r$ 이고 p 는 미분연산자이다.

자속은 전류의 항으로 표현할 수 있다.

$$\phi_{ds} = L_s i_{ds} + L_m i_{dr} ; \phi_{qs} = L_s i_{qs} + L_m i_{qr} \quad (5)$$

$$\phi_{dr} = L_r i_{dr} + L_m i_{ds} ; \phi_{qr} = L_r i_{qr} + L_m i_{qs} \quad (6)$$

$$L_s = L_{ls} + L_m, L_r = L_{lr} + L_m \quad (7)$$

고정자 전류는 입력이고 회전자 권선은 단락되어 있으므로 상태방정식은 다음 식으로 표현할 수 있다.

$$0 = \frac{R_r}{L_r} (\phi_{qr} - L_m i_{qs}) + p\phi_{qr} + \omega_s \phi_{dr} \quad (8)$$

$$0 = \frac{R_r}{L_r} (\phi_{dr} - L_m i_{ds}) + p\phi_{dr} - \omega_s \phi_{qr} \quad (9)$$

고정자 자속은 상태변수의 항으로 표현한다.

$$\phi_{ds} = L i_{ds} + \frac{L_m}{L_r} \phi_{dr} \quad (10)$$

$$\phi_{qs} = L i_{qs} + \frac{L_m}{L_r} \phi_{qr} \quad (11)$$

여기서 $L = L_{ls} + \frac{L_m L_{lr}}{L_{lr} + L_m}$ 이다.

전자기적인 토크는 다음 식과 같다.

$$T_e = K (\phi_{dr} i_{qs} - \phi_{qr} i_{ds}) \quad (12)$$

여기서 $K = \frac{3P}{2}$ 이다.

간접 벡터제어[5]에서는 $\theta_e(0)$ 는 ϕ_{qr} 가 영이 되도록 선정한다. 식 (8)과 (9)는 다음 식과 같다.

$$0 = -\frac{R_r L_m}{L_r} i_{qs} + \omega_s \phi_{dr} \quad (13)$$

$$0 = \frac{R_r}{L_r}(\phi_{dr} - L_m i_{ds}) + p\phi_{dr} \quad (14)$$

i_{ds} 가 일정하게 유지하기 위하여 제어하면 식 (14)에서 $p\phi_{dr} = 0$ 이다.

$$\phi_{dr} = L_m i_{ds} \quad (15)$$

식 (13)에서 ω_s 에 대하여 풀면 다음 식과 같다.

$$\omega_s = \frac{R_r i_{qs}}{L_r i_{ds}} \quad (16)$$

토크 식도 다음 식과 같다.

$$T_e = K \frac{L_m^2}{L_r} i_{qs} i_{ds} \quad (17)$$

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.

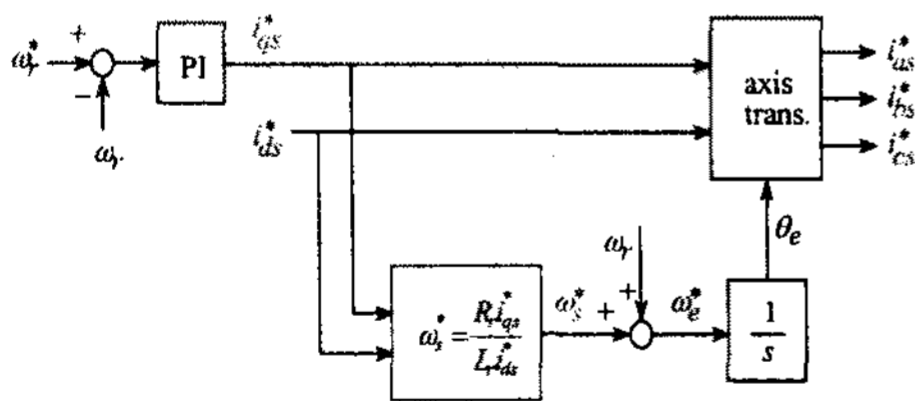


그림 1. 간접 벡터제어의 블록도
Fig. 1. Block diagram of indirect vector control

고정자 전류크기는 피크 교류전류로서 정의한다.

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

고정자 자속도 전류와 유사하게 정의한다.

$$|\phi_s| = \sqrt{\phi_{qs}^2 + \phi_{ds}^2} \quad (19)$$

3. 최대토크 제어

최대토크 제어인 MTPA(Maximum Torque per Ampere) 제어의 동작은 운전상태에서 정해진 토크와 속도에 의해 얻을 수 있다. 이 제어는 고정자 전류를 최소화하여 토크를 최대로 하는 슬립 각속도를 조절하여 얻는다. 이 슬립 각속도는 식 (18)이 일정한 조건을 이용하여 쉽게 얻을 수 있다. 식 (17)에서 i_{ds} 와 i_{qs} 의 곱을 최대로 하는 슬립 각속도를 구한다. 따라서 이러한 조건을 이용하여 i_{qs} 는 i_{ds} 와 같게 설정해야 하며 식 (16)에서 다음 식을 얻는다.

$$\omega_{s, MTPA} = \frac{R_r}{L_r} = \frac{1}{\tau_r} \quad (20)$$

여기서 τ_r 는 회전자의 시정수이다. 최대토크로 제어하기 위하여 최소 고정자 전류를 유지해야 하며 식 (20)에서 회전자 시정수의 역인 일정한 슬립 각속도에서 운전시켜야 한다.

최대 토크 및 최소 고정자 전류에서 동작은 동작 조건이 존재하므로 전 속도와 토크 영역에서 운전하기가 어렵다. 이러한 동작조건은 다음과 같이 가정한다. 1) 고정자 전류는 설정 최대치를 초과할 수 없다. 2) 고정자 자속은 설정 최대치를 초과할 수 없다. 3) 고정자 전압은 정격치를 초과할 수 없다. 조건 2)를 만족하면 조건 3)은 정격치 보다 낮은 회전자 속도에서 동작하기 위하여 만족한다. 이러한 제한 조건을 만족하기 위하여 고정자 전류와 자속은 선정된 독립변수에 의해 쉽게 표현할 수 있다.

$$|\phi_s| = \sqrt{T_e \left(\frac{a}{\omega_s} + b\omega_s \right)} < |\phi_s|_{\max} \quad (21)$$

여기서

$$a = \frac{R_r [L_m^4 + L^2 L_r^2 + 2L_m L L_r]}{L_r^2 L_m^2} \quad (22)$$

$$b = \frac{L^2 L_r^2}{R_r L_m^2} \quad (23)$$

$$|i_s| = \sqrt{T_e \frac{L_r}{L_m} \left(\frac{1}{\tau_r \omega_s} + \tau_r \omega_s \right)} < |i_s|_{\max} \quad (24)$$

자속이 정격보다 낮으면 최대 슬립 각속도는 식 (20)과 같다. 매우 큰 토크에 대하여 슬립 각속도는 자속 조건을 초과할 수 없다. 동작의 자속제한 모드에서 슬립 각속도의 표현은 식 (21)에서 $|\phi_s|=1$ 로 설정하여 얻을 수 있으며 ω_s 를 구하면 다음 식과 같다.

$$\omega_s = \frac{1 - \sqrt{1 - 4T_e^2 c}}{2T_e b} \quad (25)$$

여기서

$$c = \frac{L^2 [L_m^4 + L^2 L_r^2 + 2 L_m^2 L L_r]}{L_m^4} \quad (26)$$

일정 슬립과 동작의 자속 제한영역 사이에서 한계점은 식 (20)에서 ω_s 에 의하여 설정되고 한계점을 초과하는 ω_s 는 식 (25)를 이용한다. 식 (25)에서 한계 T_e 를 구하면 다음 식과 같다.

$$T_{e, bp} = \frac{R_r L_r}{b L_r^2 + (c R_r)^2} \quad (27)$$

$T_e < T_{e, bp}$ 에서 필요한 각속도는 식 (20)에서 주어지고 $\tau_r \omega_s = 1$ 이다. $T_e > T_{e, bp}$ 에서 필요한 슬립 각속도는 식 (25)에서 주어지고 $\tau_r \omega_s$ 는 다음 식과 같다.

$$\tau_r \omega_s = \frac{(1 - \sqrt{1 - 4T_e^2 b}) L_m^2}{2T_e L^2 L_r} \quad (28)$$

식 (17)을 i_{qs} 에 대한 식으로 풀면 다음 식과 같다.

$$i_{qs} = \frac{K_1 T_e}{i_{ds}} \quad (29)$$

여기서 $K_1 = L_r / K L_m^2$ 이다.

식 (29)을 식 (18)에 대입하여 정리하면 다음 식과 같다.

$$|i_s| = \sqrt{(K_1 T_e)^2 i_{ds}^{-2} + i_{ds}^2} \quad (30)$$

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

$$i_{ds} = \sqrt{K_1 T_e} \quad (31)$$

FNN을 이용한 최대토크 제어에 대한 블록도는 그림 2와 같다.

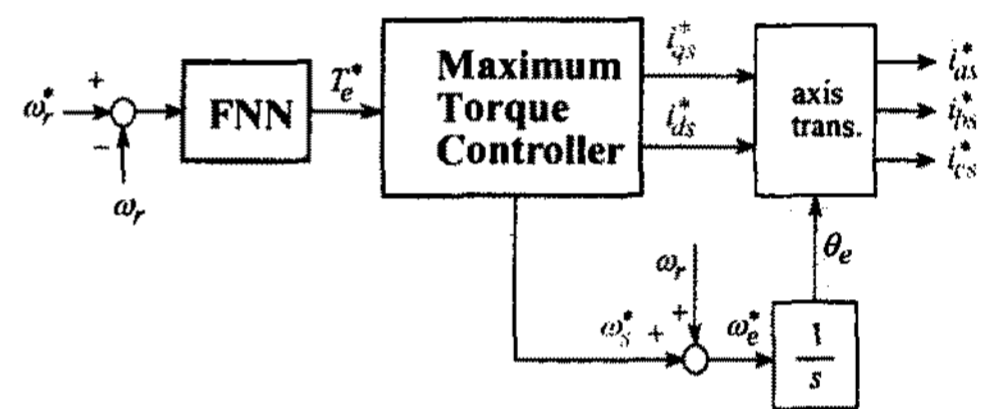


그림 2. FNN 제어를 이용한 최대토크 제어의 블록도
Fig. 2. Block diagram of maximum torque control using FNN controller

4. FNN 제어기의 설계

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 FNN 제어기를 구성한다[4]. 그림 3은 유도전동기 드라이브의 제어를 위하여 퍼지-신경회로망 제어기의 구조를 나타낸다.

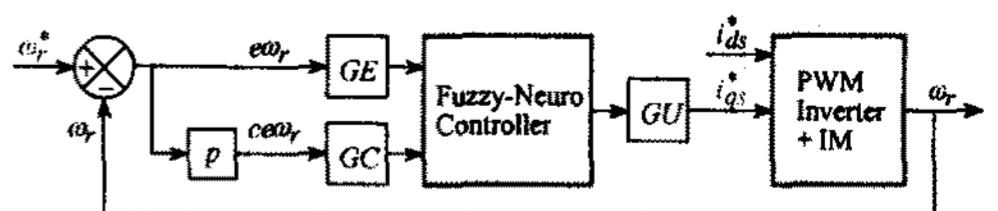


그림 3. FNN 제어기의 구조
Fig. 3. Structure of FNN controller

그림 4는 FNN 제어기의 구성을 나타내며 여기서

두 개의 입력변수는 오차 e 와 오차의 변화분 ce 이고 출력변수는 제어변수 u 이다.

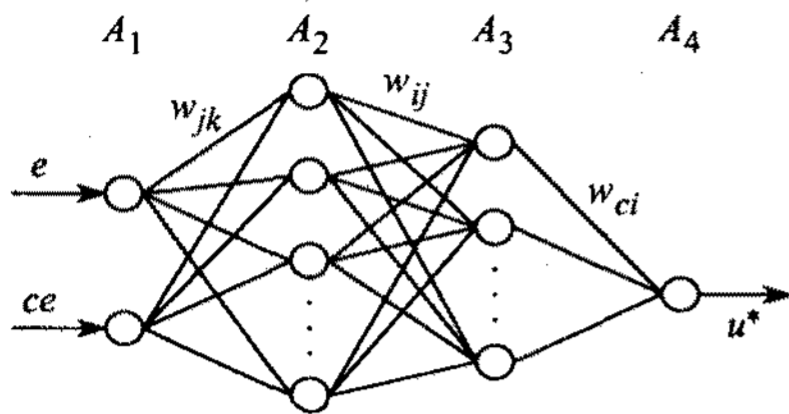


그림 4. FNN 제어기의 구성
Fig. 4. The construction of FNN controller

5. 시스템의 성능결과

그림 5는 FNN 및 최대토크 제어기에 의한 유도전동기의 드라이브 시스템을 나타낸다. 지령 d 축 전류는 최대토크 제어기에 의하여 제어되며 속도는 FNN 제어기에 의해 제어된다.

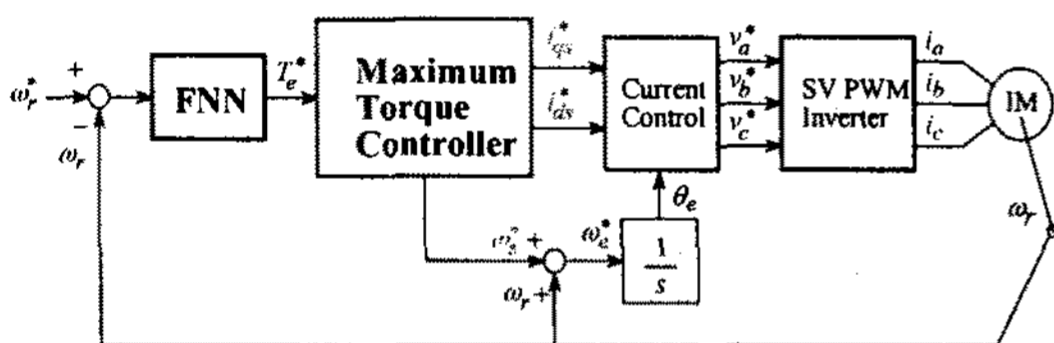


그림 5. FNN 및 최대토크 제어기에 의한 유도전동기의 드라이브 시스템
Fig. 5. Drive system of induction motor with FNN and maximum torque controller

유도전동기의 파라미터는 표 1과 같다.

표 1. 유도전동기의 파라미터
Table 1. Parameters of induction motor

Induction Motor : 220[V] 2.2[kW] 4극	
$R_s = 0.59 [\Omega]$	$L_s = 64.72 [\text{mH}]$
$R_r = 0.18 [\Omega]$	$L_r = 64.72 [\text{mH}]$
$f = 60 [\text{Hz}]$	$L_m = 61.91 [\text{mH}]$

그림 6은 0.5[sec]에서 지령속도를 1800[rpm]으로 운전하였을 경우 종래의 PI 제어기와 본 논문에서 제시한 최대토크 제어기의 응답특성을 비교한다. 그림 6 (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 최대토크 제어기가 종래의 PI 제어기 보다 빠르게 안정화되고 오버슈트도 매우 작게 나타나므로 응답 특성이 양호하다. 그리고 그림 (d)에서 최대토크 제어기는 전류의 크기도 작게 나타나므로 상대적으로 토크는 크게 된다.

그림 7은 지령속도를 1800[rpm]으로 운전하다가 1[sec]에서 1000[rpm]으로 속도를 변화시켰을 경우에 나타나는 응답특성이다. 이 경우에도 최대토크 제어기가 PI 제어기에 비해 속도추정이 빠르고 오버슈트도 작다. 그리고 전류의 크기가 작으므로 큰 토크를 얻을 수 있다.

그림 8은 1000[rpm]으로 정상상태로 운전을 하다가 0.6~0.9[sec]에서 3[N·m]의 부하를 인가하였을 경우에 나타나는 응답특성이다. 부하를 인가한 경우에도 최대토크의 성능은 양호하게 나타나고 있다.

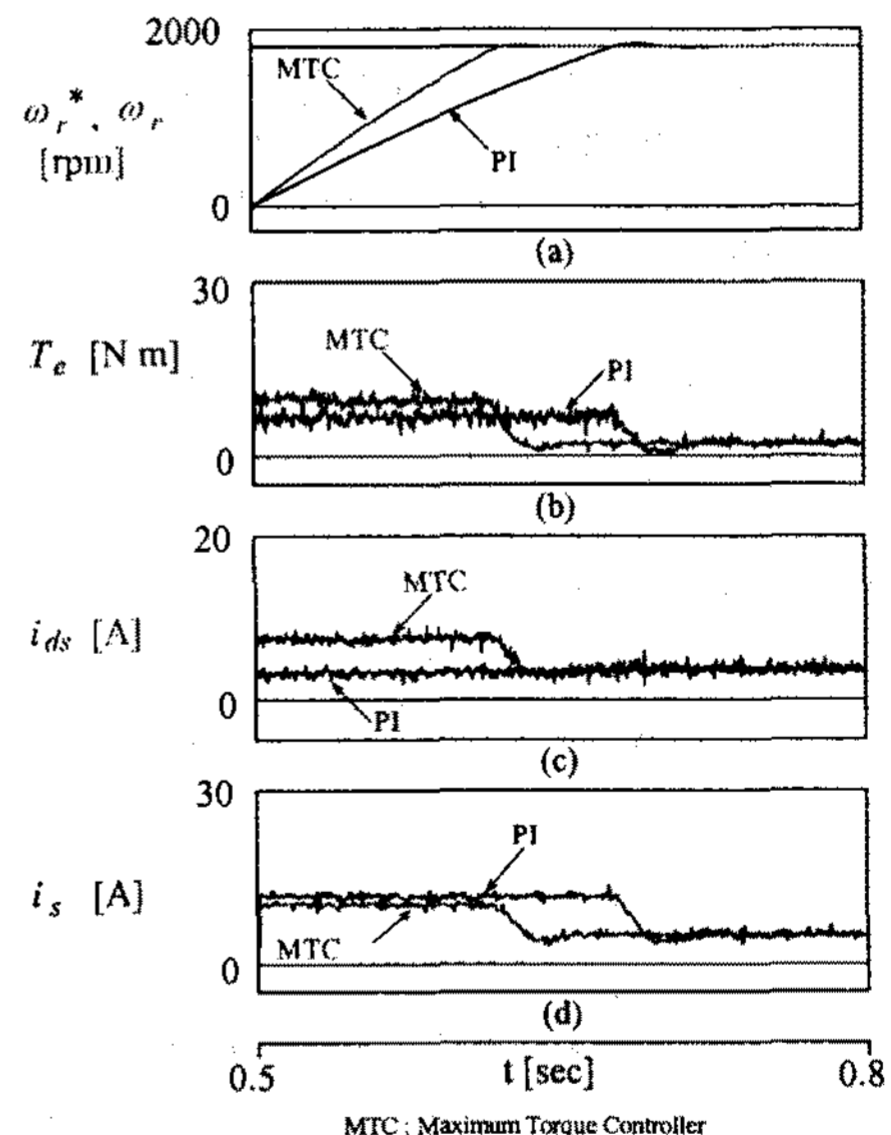


그림 6. 스텝 지령속도에 의한 응답특성 비교
Fig. 6. The comparison of response characteristics with step command speed

그림 9는 정·역회전을 시켰을 경우 나타나는 응답특성이다. 지령속도를 1000[rpm]과 -1000[rpm]으로 반복하여 정·역회전한다. 최대토크 제어기가 빠르게 정상상태에 도달하고 전류의 크기가 감소되므

FNN 제어를 이용한 유도전동기 드라이브의 최대토크 제어

로 토크는 증가하게 된다. 따라서 최대토크 제어기는 종래의 PI 제어기에 비해 속도 및 부하토크 등 파라미터의 변동에도 우수한 성능이 나타난다.

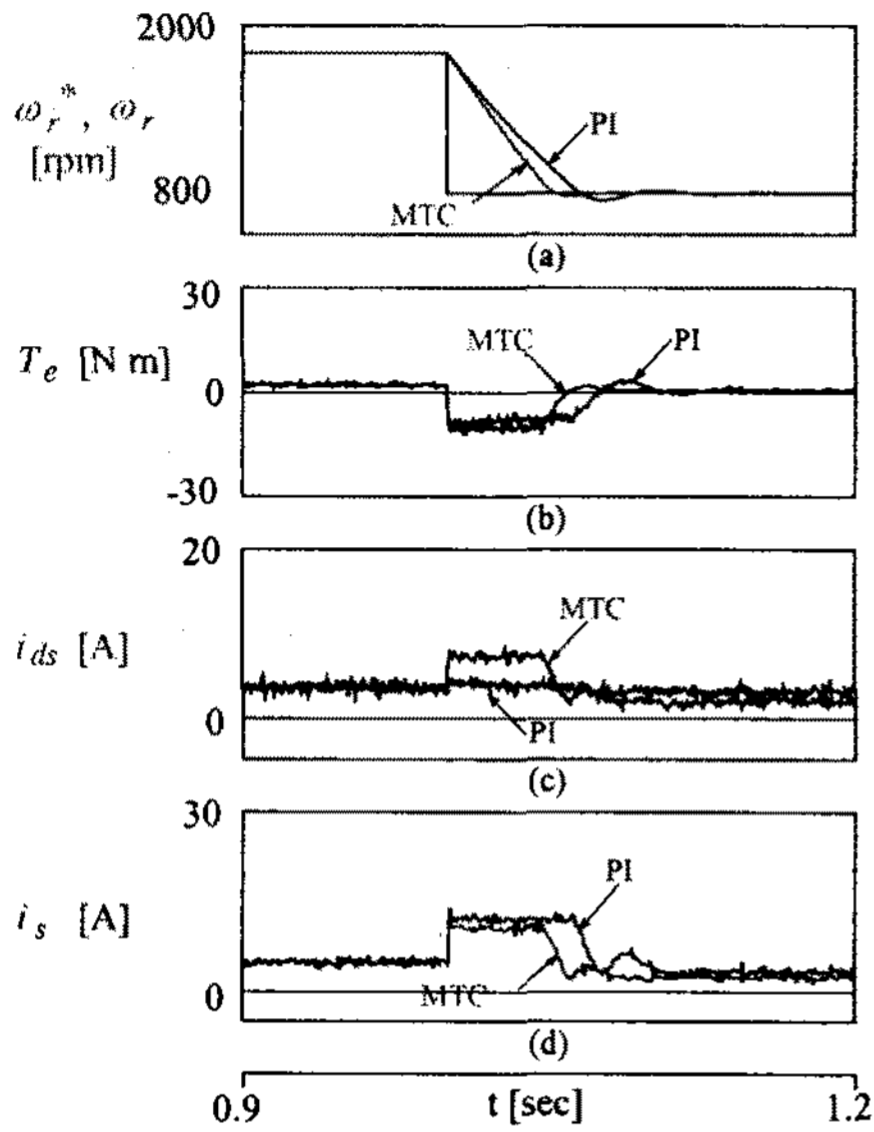


그림 7. 지령속도의 변동에 대한 응답특성의 비교
Fig. 7. The comparison of response characteristics with command speed change

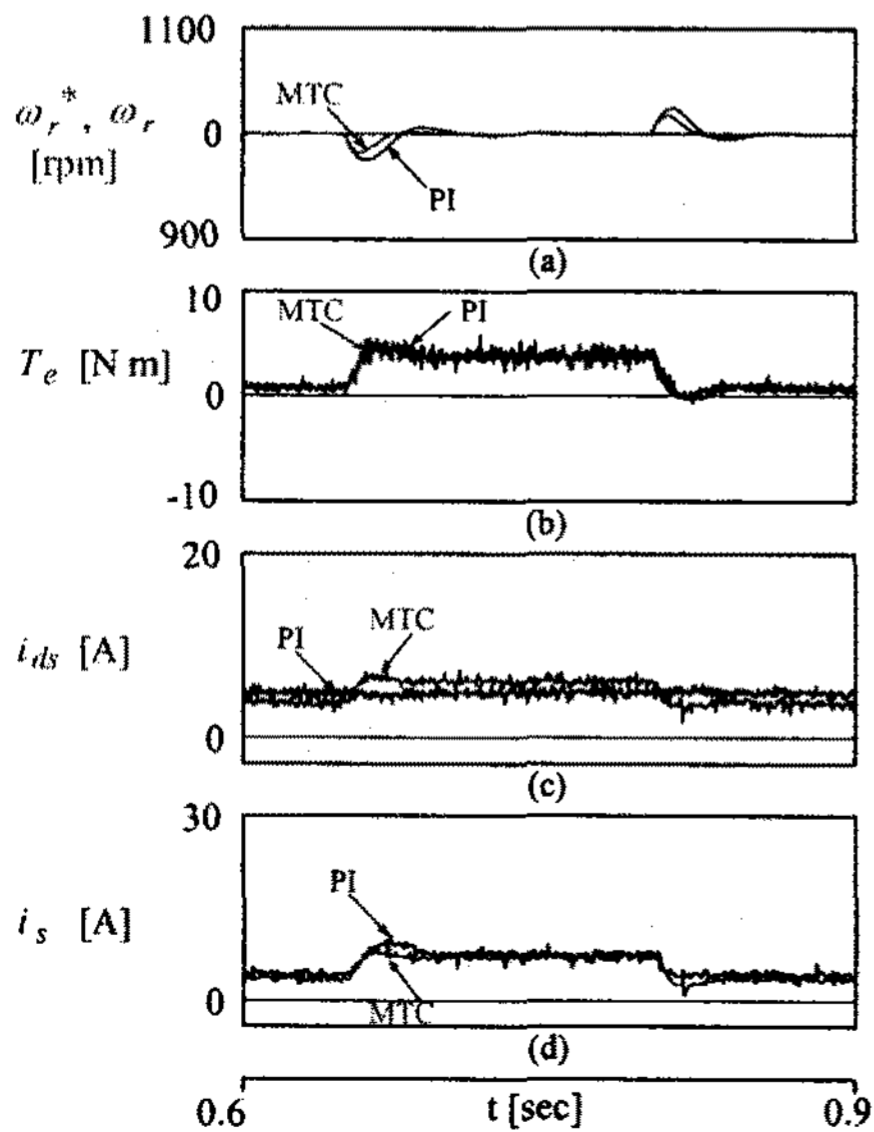


그림 8. 부하토크 변동에 대한 응답특성의 비교
Fig. 8. The comparison of response characteristics with load torque change

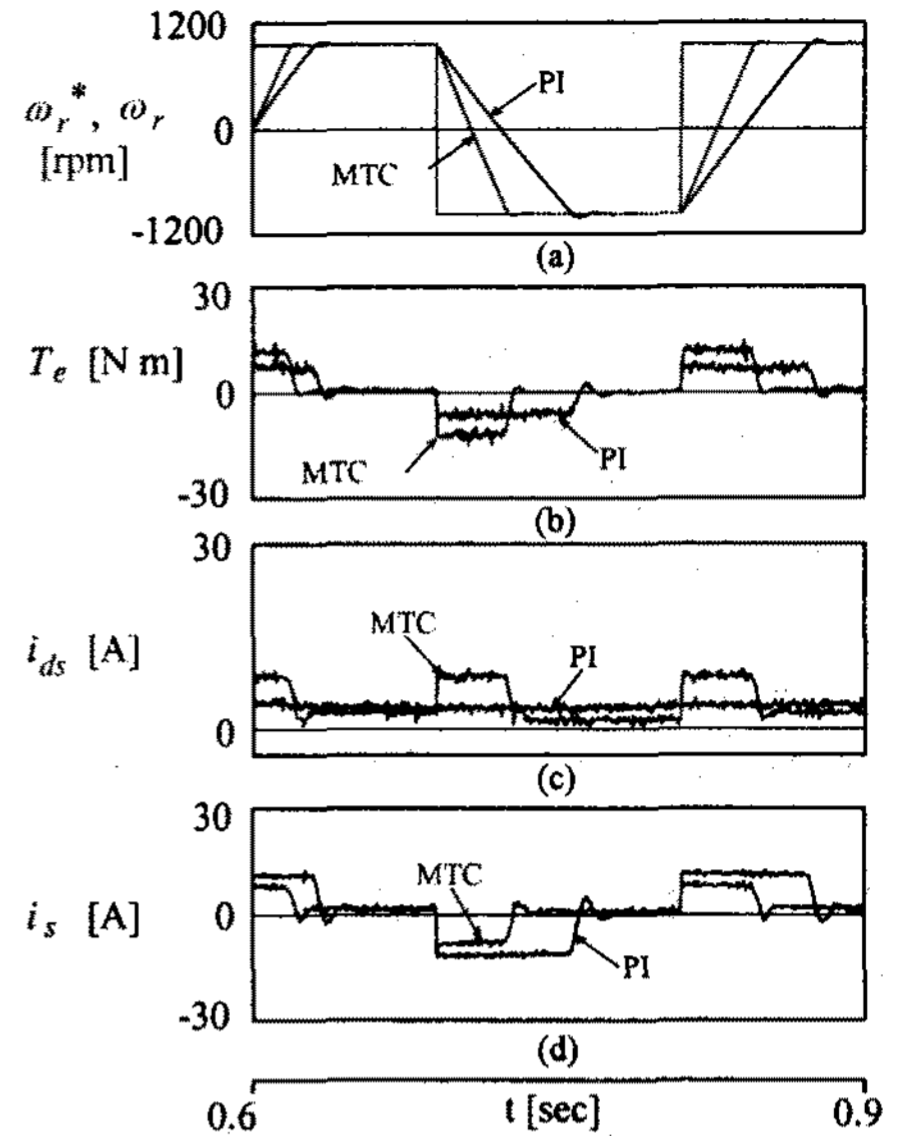


그림 9. 정·역회전에서 응답특성 비교
Fig. 9. The comparison of response characteristics at forward and reverse drive

6. 결 론

본 논문은 FNN 제어를 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 제어기는 클러스터링 방법과 다층 신경회로망에 의해 퍼지룰의 전반부와 후반부로 구성한다. FNN 제어기는 퍼지제어의 강인성과 고성능 제어의 장점을 얻을 수 있으며 신경회로망의 학습능력과 적응제어의 장점을 얻을 수 있다. FNN 제어를 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.

본 연구는 2005년도 순천대학교 산·학·연 컨소시엄 사업에 의해 수행되었으며 이에 감사드립니다.

References

- [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] B. K. Bose, "Power electronics and ac drive," Prentice-Hall, Englewood Cliffs, New Jersey, 1986.

◇ 저자소개 ◇

김종관 (金鍾官)

1958년 5월 24일생. 1999년 한려대학교 건축설비학과 졸업. 2001년 순천대 대학원 전기공학과 졸업(석사). 2005년 동 대학원 박사과정 수료.

박기태 (朴基泰)

1974년 2월 9일생. 1999년 순천대 공대 전기제어공학과 졸업. 2001년 동 대학원 전기공학과 졸업(석사). 2005년 동 대학원 박사과정.

정동화 (鄭東和)

1955년 8월 15일생. 1979년 영남대 공대 전기공학과 졸업. 1981년 한양대 대학원 전기공학과 졸업(석사). 1987년 동 대학원 전기공학과 졸업(박사). 1988년~1989년 현대중전기(주) 기술연구소 책임연구원. 1989년~현재 순천대 정보통신공학부 교수.

차영두 (車永斗)

1951년 5월 6일생. 1972년 조선대 공업전문대학 졸업. 1993년 연세대 산업대학원 수료. 1992년~현재 (주)태성계전 대표이사.