유도전동기의 최대토크 제어를 위한 인공지능 PI 제어기 개발

강성준, 고재섭, 최정식, 백정우, 장미금, 문주희, 정동화
순천대학교 전기제어공학과

Development of Artificial Intelligent PI controller for Maximum Torque Control of Induction Motor

Sung-Jun Kang, Jae-sub Ko, Jung-Sik Choi, Jung-Woo Baek, Mi-Geum Jang, Ju-Hui Moon, Dong-Hwa Chung
Department of Electrical Cotron Engineering, Sunchon National University

ABSTRACT

The maximum output torque developed by the machine is dependent on the allowable current rating and maximum voltage that the inverter can supply to the machine. Therefore, to use the inverter capacity fully, it is desirable to use the control scheme considering the voltage and current limit condition, which can yield the maximum torque per ampere over the entire speed range. This controller is controlled speed using artificial intelligent PI(AIPI) controller. Also, this paper is proposed control of maximum torque per ampere(MTPA) of induction motor. The performance of the proposed induction motor drive with maximum torque control using AIPI controller is verified by analysis results at dynamic operation conditions.

1. 서 론

가변속 제어 시스템은 생산력을 높이기 위하여 가능한 고속으로 지령속도를 추종해야 한다. 입력 전압과 전류의 조건에서 최대토크를 발생할 수 있는 제어방식이 필요하다.[1] 최근 퍼지 제어, 신경회로망 및 유전자 알고리즘 등을 이용한 인공지능 제어는 전력전자 시스템의 성능을 향상시킬 수 있는 중요한 기법으로 인식되고 있다. 그리고 이들 기법간의 상호 혼합한 방식은 적응성 및 강인성이 요구되는 유도전동기 드라이브에서 진가를 유감없이 발휘될 전망이다.[2-3] 본 논문에서의 인공지능 PI(Artificial Intelligent PI) 제어기는 유도전동기의 속도를 제어하고 출력성분인 지령토크를 이용하여 최대토크 제어를 수행한다. 그리고 ANN (Artificial Neural Network)을 이용하여 유도전동기의 속도를 추정한다. 유도전동기 드라이브 시스템을 구성하여 제시한 제어기를 적용하여 다양한 성능과 최대토크의 특성을 분석한다. 그리고 본 논문의 효용성을 입증하기 위하여 종래의 방식과 비교하고 결과를 제시한다.

2. 최대토크 제어

유도전동기 상태방정식에서 i_{ds}와 i_{qs}의 곱을 최대로 하는 슬립 각속도를 구한다.

$$\omega_{s,\mathrm{MTPA}} = \frac{R_r}{L_r} = \frac{1}{\tau_r} \tag{1}$$

고정자 전류와 자속은 선정된 독립변수에 의해 쉽게 표현할 수 있다.

$$|\phi_s| = \sqrt{T_e\left(\frac{a}{\omega_s} + b\omega_s\right)} < |\phi_s|_{\max} \tag{2}$$

여기서 $a = \dfrac{R_r\left[L_m^4 + L^2L_r^2 + 2L_m^2LL_r\right]}{L_r^2L_m^2}$, $b = \dfrac{L^2L_r^2}{R_rL_m^2}$,,

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

자속이 정격보다 낮으면 최대 슬립 각속도는 식 (1)과 같다. 매우 큰 토크에 대하여 슬립 각속도는 식 (2)에서 $|\phi_s|=1$로 설정하여 얻을 수 있으며 다음 식과 같다.

$$\omega_s = \frac{1-\sqrt{1-4T_e^2c}}{2T_eb} \tag{3}$$

여기서 $c = \dfrac{L^2\left[L_m^4 + L^2L_r^2 + 2L_m^2LL_r\right]}{L_m^4}$

유도전동기의 토크식을 i_{qs}에 대한 식으로 풀면 다음 식과 같다.

$$i_{qs} = \frac{K_1T_e}{i_{ds}} \tag{4}$$

여기서 $K_1 = L_r / KL_m^2$ 이다.

고정자 전류크기는 피크 교류전류로서 정의한다

$$|i_s| = \sqrt{i_{qs}^2 + i_{ds}^2} \tag{5}$$

식 (4)을 식 (5)에 대입하여 정리하면 다음 식과 같다.

$$|i_s| = \sqrt{(K_1T_e)^2i_{ds}^{-2} + i_{ds}^2} \tag{6}$$

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

$$i_{ds} = \sqrt{K_1T_e} \tag{7}$$

AIPI를 이용한 최대토크 제어에 대한 블록도는 그림 1과 같다.

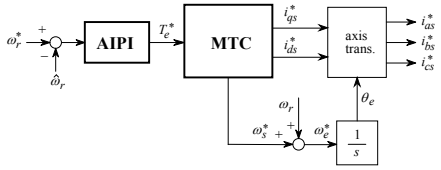

그림 1 AIPI 제어기를 이용한 최대토크 제어의 블록도.
Fig. 1 Block diagram of maximum torque control using AIPI controller.

3. 인공지능 PI 제어기의 설계

그림 2는 FNN의 구성을 나타내며 여기서 두 개의 입력변수는 오차 e와 오차의 변화분 ce이고 출력변수는 Δk_p, Δk_i이다.

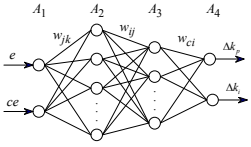

그림 2 FNN의 구성.

Fig. 2 The construction of FNN.

그림 2에서 A_1층에서 A_3층 사이에 신경회로망은 퍼지룰의 조건부의 구현을 나타낸다. 오차함수를 정의한 후, 오차를 최소화하기 위하여 오차 역전파 알고리즘에 의해 A_1층과 A_3층 사이에 가중치 W_{jk}와 W_{ij}를 조절한다.

$$W_{ij}(t+1)=W_{ij}(t)+\Delta W_{ij}+\alpha[W_{ij}(t)-W_{ij}(t-1)] \quad (8)$$

$$W_{jk}(t+1)=W_{jk}(t)+\Delta W_{jk}+\alpha[W_{jk}(t)-W_{jk}(t-1)] \quad (9)$$

그림 2에서 A_3층과 A_4층 사이의 신경회로망은 퍼지룰의 후반부의 구현을 나타낸다. 학습 동안 가중치 W_{ci}는 오차 함수를 최소화하기 위하여 조절한다.

$$\Delta W_{ci}=-\eta\frac{\partial E^*}{\partial W_{ci}}=-\eta\delta_c O_i \quad (10)$$

$$W_{ci}(t+1)=W_{ci}(t)+\Delta W_{ci}+\alpha[W_{ci}(t)-W_{ci}(t-1)] \quad (11)$$

그림 3은 ALM과 FNN을 혼합 적용한 인공지능PI 제어기의 블록도를 나타낸다.

$$em(kT)=\omega_m(kT)-\hat{\omega}_r(kT) \quad (12)$$

$$cem(kT)=em(kT)-em(kT-T) \quad (13)$$

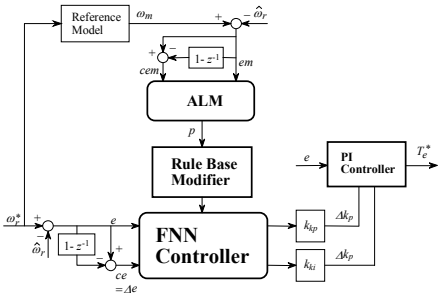

그림 3 인공지능 PI 제어기.
Fig. 3 Artificial Intelligent PI Controller.

지식베이스의 수정자는 $p(kT)$에 따라서 FNN 제어기의 지식베이스를 변화시킨다. 이 변화는 FNN 제어기에서 출력의 멤버쉽 함수의 중앙을 수정하여 구현하며 수정하는 식은 다음과 같다.

$$C_i(kT)=C_i(kT-T)+p(kT) \quad (14)$$

4. 시스템의 성능결과

그림 4는 0.1[sec]에 1,800[rpm]으로 운전 중, 0.6[sec]에서 0.8[sec]에 부하토크를 5[N.m]인가하였을 때 응답특성을 나타낸다. 그림 4(a)는 AIPI, PI 제어기의 지령속도와 추정속도, 그림 4(b), (c)는 AIPI 제어기에 의해서 제어되는 k_p와 k_i를 나타내고 그림 4(d)는 발생토크를 나타낸다. 그림 5은 그림 4의 과도상태 부분을 명확하게 분석하기 위하여 확대하여 해석한 결과이다. 그림 5(a)는 속도 상승부분을 나타내며, 그림 5(b)는 부하 변화부분을 나타낸다. 본 논문에서 제시한 AIPI 제어기가 종래의 PI제어기에 비하여 오버슈트가 작고 안정화 시간이 빠르게 나타나고 있다. 그림 6은 1,800[rpm]과 −1,800[rpm]으로 정·역 운전하였을 경우 응답특성을 나타낸다. 정·역으로 운전하였을 경우에도 본 논문에서 제시한 최대토크 제어가 종래의 제어기에 비하여 속도가 빠르게 상승하고 있으며 발생토크도 크게 발생하고 있어 우수한 응답특성을 나타낸다. 그림 7은 4상한 운전에 대한 응답특성을 나타낸다. 그림 7(a)는 최대토크 제어를 하지 않았을 경우의 지령속도와 추정속도, 그림 7(b)는 본 논문에서 제시한 최대토크 제어의 지령속도와 추정속도, 그림 7(c)는 속도오차, 그림 7(d)는 발생토크를 나타낸다. 그림 7(c)에서 본 논문에서 제시한 최대토크 제어의 속도오차가 작게 나타나 더욱 우수한 응답특성을 나타내고 있다.

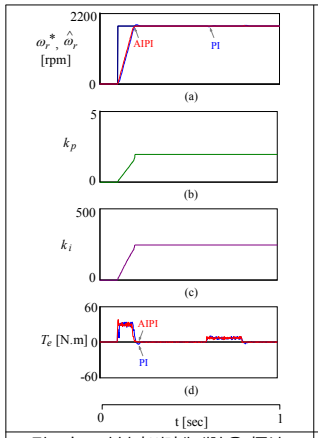

그림 4 속도 및 부하변화에 대한 응답특성.
Fig. 4 Response characteristic with command speed and load torque variation.

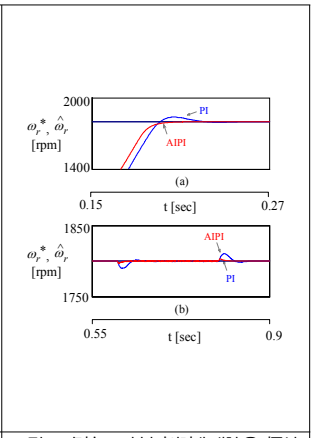

그림 5 지령속도 및 부하변화에 대한 응답특성.
Fig. 5 Response characteristic with command speed and load torque variation.

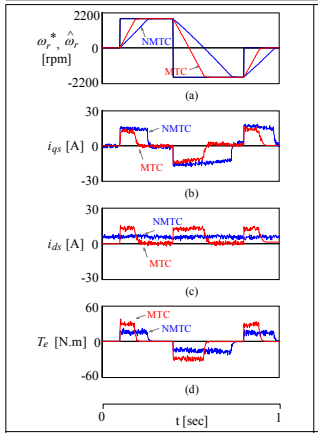

그림 6 정역 운전에 대한 최대토크 응답특성.
Fig. 6 Response characteristic maximum torque control with forward and reverse operation.

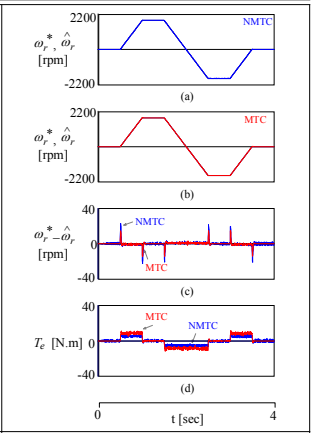

그림 7. 4상한 운전에 대한 최대토크 응답특성
Fig. 7. Response characteristic of maximum torque control with quadrant drive

5. 결 론

본 논문은 인공지능 PI(AIPI) 제어기를 이용하여 유도전동기 드라이브의 최대토크 제어를 제시하였다. AIPI 제어기는 퍼지제어와 적응제어를 혼합한 ALM-FNN제어기를 통해 전동기 동작상태에 따라 PI 제어기의 이득값을 자동으로 계산한다. 또한 본 논문에서는 전동기 동작 상태에 따라 최적의 슬립주파수를 계산하고 슬립주파수를 이용하여 최대토크 제어를 위한 d, q축 전류를 계산한다. 계산된 d, q축 전류를 통해 최대토크 제어를 수행한다. 본 논문에서 제시한 AIPI 제어기는 유도전동기에 적용하여 정상상태, 과도상태, 속도 및 부하토크 변화에 대한 응답특성을 비교하였다. 본 논문에서 제시한 최대토크제어가 종래의 PI 제어기 보다 우수한 성능을 얻을 수 있으므로 본 논문의 타당성을 입증할 수 있었다.

참 고 문 헌

[1] 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.

[2] J. S. Choi, J. S. Ko and D. H. Chung, "Hybrid artificial intelligent control for speed control of induction motor," ICCAS '06, TPA-6, 2006.

[3] D. H. Chung, et al., "Development of hybrid artificial intelligent controller for high performance of induction motor," ICEE '06, pp. 101, 2006.