

적응학습 뉴로 퍼지제어기를 이용한 유도전동기의 최대 토크 제어

고재섭, 최정식, 김도연, 정병진, 강성준, 정동화
순천대학교

Maximum Torque Control of Induction Motor using Adaptive Learning Neuro Fuzzy Controller

Jae-Sub Ko, Jung-Sik Choi, Do-Yeon Kim, Byung-Jin Jung, Sung-Joon Kang, Dong-Hwa Chung
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.

The paper is proposed maximum torque control of induction motor drive using adaptive learning neuro fuzzy controller and artificial neural network(ANN). The control method is applicable over the entire speed range and considered the limits of the inverter's current and voltage rated value. For each control mode, a condition that determines the optimal d, q axis current i_{ds}, i_{qs} for maximum torque operation is derived. The proposed control algorithm is applied to induction motor drive system controlled adaptive learning neuro fuzzy controller and ANN controller, the operating characteristics controlled by maximum torque control are examined in detail. Also, this paper is proposed the analysis results to verify the effectiveness of the adaptive learning neuro fuzzy controller and ANN controller.

1. 서 론

유도전동기는 AC 서보, 견인 및 전기자동차, 스피들 드라이와 같은 다양한 적용분야에 많이 사용되고 있다. 유도전동기의 고성능 토크제어는 지령전류를 추종하는 전류제어기를 위하여 빠르고 충분한 전류응답을 필요로 한다. 그러나 인버터의 DC 링크에서 전압과 전류의 한계 때문에 전동기의 입력전압 및 전류는 제한된다. 가변속 제어 시스템은 생산력을 높이기 위하여 가능한 고속으로 지령속도를 추종해야 한다. 입력 전압과 전류의 조건에서 최대토크를 발생할 수 있는 제어방식이 필요하다.[1] 속 범위에서 유도전동기의 출력 토크 능력은 약계자 제어 방식에 의존한다. 일반적으로 많이 사용하는 약계자의 방식은 회전속도에 반비례하는 회전자 기준자속을 변화시킨다.[2] 이 방법에서는 기준자속이 매우 커지기 때문에 전류를 조절할 수 있는 충분한 전압이득을 유지하지 못한다. 결국 이 방법은 제한된 조건 내에서 토크 능력을 최대로 할 수 없다. 본 논문에서는 ALM-FNN(Adaptive Learning Mechanism Fuzzy Neural Network) 제어기는 유도전동기의 속도를 제어하고 출력 성분인 지령토크를 이용하여 최대토크 제어를 수행한다. 그리고 MFC(Model Reference Adaptive-Fuzzy Control) 제어기는 전류를 제어하고 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

그림 1은 전류와 전압 한계조건에서 전류제어를 $i_{ds}-i_{qs}$ 평면에 나타내고 있다.

모드 I : 일정 최대 토크에 의한 전류제한 영역 ($\omega_r < \omega_b$)

모드 II : 전류와 전압의 제한영역 ($\omega_b < \omega_r < \omega_c$)

모드 III : 전압제한 영역 ($\omega_c < \omega_r$)

동기축에서 회전자 자속방향에 대한 유도전동기의 정상상태에서 전압 방정식은 다음과 같다.

$$v_{ds} = R_s i_{ds} - \omega_e \sigma L_s i_{qs} \tag{1}$$

$$v_{qs} = R_s i_{qs} + \omega_e L_s i_{ds} \tag{2}$$

정상상태에서 발생토크는 다음과 같다.

$$T_e = \frac{3}{2} \cdot \frac{P}{2} \cdot \frac{L_m}{L_r} i_{ds} i_{qs} \tag{3}$$

최대 고정자 전압 V_{smax} 는 이용 가능한 DC 링크전압과 PWM 방식에 의해 결정된다. 전압제한 조건은 다음과 같다.

$$v_{ds}^2 + v_{qs}^2 \leq V_{smax}^2 \tag{4}$$

최대 고정자 전류 I_{smax} 는 인버터 정격과 기기 열적 정격에 의하여 제한된다. 전류제한 조건은 다음과 같다.

$$i_{ds}^2 + i_{qs}^2 \leq I_{smax}^2 \tag{5}$$

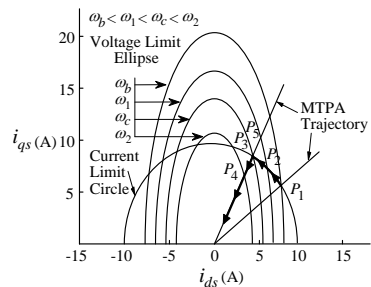


그림 1. $i_{ds}-i_{qs}$ 평면에서 전류제어

모드 I의 동적점에서 MTPA에 도달하기 위하여 다음 조건을 만족해야 한다.

$$\frac{\partial T_e}{\partial i_{ds}} = 0 \tag{6}$$

식 (6) 조건을 이용하여 다음 식을 얻는다.

$$i_{ds1} = \frac{I_{smax}}{\sqrt{2}} \tag{7}$$

이와 유사한 방식으로 i_{qs} 를 구하면 다음과 같다.

$$i_{qs1} = \frac{I_{smax}}{\sqrt{2}} \tag{8}$$

i_{ds}^* 와 i_{qs}^* 의 조합의 조건은 수없이 많다. 이 중에서 다음 함수 f 를 최대화하는 조합은 출력 토크를 최대화하기 위하여 최적 조합이 된다. 함수 f 는 다음과 같이 정의한다.

$$f = \frac{T_e}{k_1} = i_{ds}^* i_{qs}^* \tag{9}$$

최적 전류는 식 (4), (5) 및 (9)에 의하여 결정된다. FWR는 두 구간으로 나누어진다. 각 구간에서 출력 토크는 전압과 전류 제한에 의해 영향을 받으며 최대 토크를 위한 최적 전류조건은 각각 다르다.

전압과 전류 제한조건을 만족하기 위하여 지령전류는 주어진 속도에서 전압타원과 전류원의 공통영역 내에서 존재해야 한다. 이 영역은 모드 II에 해당하며 그림 1에서 점 P_1 에서 점 P_3 까지 일정 전류원을 따라 동작한다.

최적 전류는 식 (4), (5) 및 (9)에 의해서 구한다.

$$i_{ds2}^* = \sqrt{\frac{(V_{smax} / \omega_e)^2 - (\sigma L_s I_{smax})^2}{L_s^2 (1 - \sigma^2)}} \tag{10}$$

$$i_{qs2}^* = \sqrt{I_{smax}^2 - i_{ds2}^2} \tag{11}$$

전압제한 영역 ($\omega_c < \omega_r$)은 그림 1의 모드 III에 해당하며 전압과 전류

의 두 조건을 고려해야 한다.

식 (1)와 (4)를 이용하여 식 (9)를 다시 나타낸다.

$$f = i_{ds}^* \cdot \frac{\sqrt{V_{s\max}^2 - (\omega_e L_s)^2 i_{ds}^{*2}}}{\omega_e \sigma L_s} \quad (12)$$

$\partial f / \partial i_{ds}^* = 0$ 의 조건을 만족하는 해를 구한다.

$$i_{ds3}^* = \frac{V_{s\max}}{\sqrt{2} \omega_e L_s} \quad (13)$$

i_{qs}^* 도 같은 방법으로 구할 수 있다.

$$i_{qs3}^* = \frac{V_{s\max}}{\sqrt{2} \omega_e \sigma L_s} \quad (14)$$

모드 I은 식 (7), (8) 모드 II는 식 (10)와 (11) 그리고 모드 III는 식 (13)와 (14)을 사용하여 제어한다.

그림 2는 유도전동기의 최대토크 제어 시스템을 나타낸다. 속도제어에서는 ALM-FNN을 이용하고 MTPA와 제한조건을 이용하여 지령 i_{ds} 와 i_{qs} 를 구한다. 전류제어에서는 MTC를 이용하고 속도의 추정을 위하여 ANN을 이용한다.

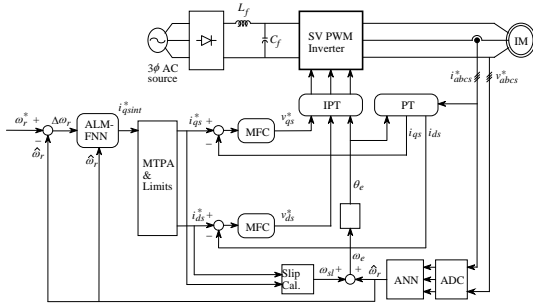


그림 2. 유도전동기의 최대토크 제어 시스템

3. 적응학습 뉴로 퍼지 제어기의 설계

그림 3은 적응 학습 메카니즘을 이용한 FNN 제어기인 ALM-FNN 제어기의 구조를 나타낸다.

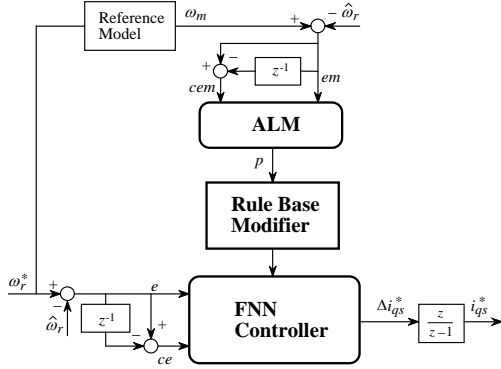


그림 3. ALM-FNN 제어기

드라이브 시스템의 속도성능은 기준모델의 속도와 추정속도의 오차에 의해 좌우된다.

$$em(kT) = \omega_m(kT) - \hat{\omega}_r(kT) \quad (15)$$

$$cem(kT) = em(kT) - em(kT - T) \quad (16)$$

지식베이스의 수정자는 $p(kT)$ 에 따라서 FNN 제어기의 지식베이스를 변화시킨다.

$$C_i(kT) = C_i(kT - T) + p(kT) \quad (17)$$

4. 시스템 성능결과

그림 4는 지령속도를 1800[rpm]에서 1000[rpm]으로 변화시켰을 경우 응답특성을 나타낸다. 그림 5는 그림 4를 명확하게 해석하기 위해서 확대한 그림이다. 그림 4(a)는 속도상승부분, 그림 4(b)는 속도하강부분을 나타낸다. 그림 5에서 ALM-FNN 제어기는 FNN, PI 제어기에 비하여 오버슈트가 작고, 상승시간 및 안정화 시간이 빠르게 나타난다.

그림 6은 지령속도를 5400[rpm]으로 하였을 경우 최대토크 제어 및 IRS에 대한 응답특성 비교를 나타낸다. 최대토크 제어는 종래의 IRS 방법 보다 지령속도를 빠르게 추종하고 있으며, 그림 6(d)에 나타난 것과

같이 토크도 더 높게 나타나고 있다. 그림 7은 속도에 따른 단위전류당 토크를 나타낸다. 본 논문에서 제시한 최대토크제어가 종래의 IRS 방법 보다 단위전류당 토크가 높게 나타나고 있다.

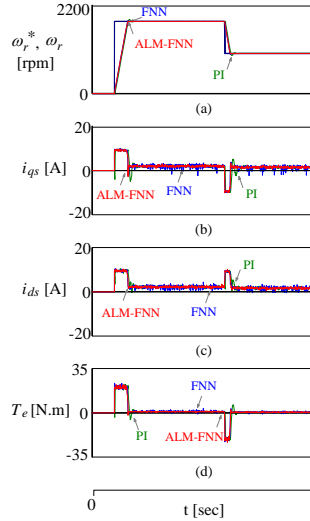


그림 4. 지령속도 변화에 대한 응답특성 비교

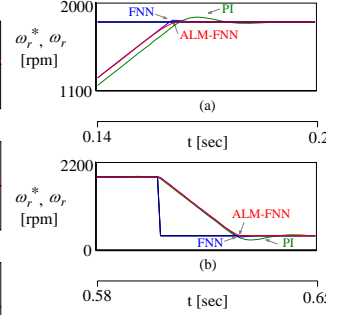


그림 5. 지령속도 변화에 대한 응답특성 비교

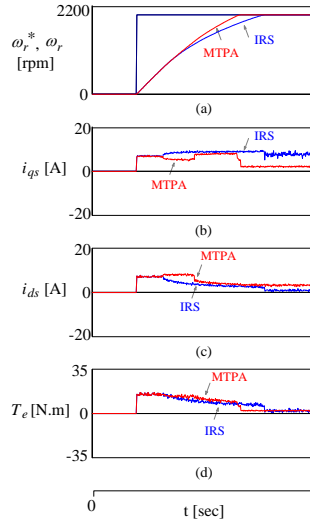


그림 6. 최대토크 제어 응답특성 비교

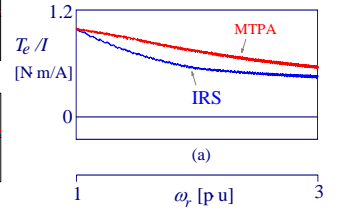


그림 7. IRS와 최대토크 제어 응답 비교

5. 결론

본 논문은 적응학습 뉴로 퍼지 제어기를 이용하여 유도전동기의 최대토크 제어를 제시한다. 종래에 사용된 IRS 방법은 회전속도에 반비례하는 기준회전자 자속을 변화시킨다. 그러나 이 방법에서는 단지 전류제한만 고려하였으므로 드라이브 시스템의 최대 토크능력을 완전하게 사용할 수 없다. 본 논문에서는 전압과 전류조건을 고려하여 고속영역에서 유도전동기의 최대 토크능력을 유지할 수 있는 새로운 최대토크 제어를 제시하였다. 드라이브 시스템의 정격속도 이하에서는 일정 토크 영역으로 운전하고 정격속도 이상에서는 약제자 영역인 일정 전력영역으로 운전하였다. 또한 ALM-FNN 제어기를 이용하여 고성능 속도제어를 이룩할 수 있었다. ALM-FNN 제어기는 FNN 및 PI 제어기에 비하여 오버슈트가 작고, 상승시간 및 안정화 시간이 빠르게 나타났으며, 최대토크 제어는 종래의 IRS 방법에 비하여 지령속도를 빠르게 추종하였으며, 단위전류당 토크도 크게 나타났다. 따라서 본 논문에서 제시한 최대토크 제어 방법의 타당성을 입증할 수 있었다.

[참고문헌]

- [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] R. Joetten and H. Schierling, "Control of the induction machine in the field weakening range," in Proc. IFAC, pp. 297-304, 1983.