

적용 퍼지-뉴로 제어기를 이용한 IPMSM 드라이브의 최대 토크 제어

김도연, 고재섭, 최정식, 정병진, 박기태, 최정훈, 정동화

순천대학교 공과대학 정보통신공학부

Maximum Torque Control of IPMSM Drive using Adaptive Fuzzy-Neuro Controller

Do-Yeon Kim, Jae-Sub Ko, Jung-Sik Choi, Byung-Jin Jung, Ki-Tae Park, Jung-Hoon Choi, Dong-Hwa Chung

School of Information & Communication Engineering, Sunchon National Univ.

Abstract - This paper proposes maximum torque control of IPMSM drive using Adaptive Fuzzy-Neuro controller and artificial neural network(ANN). The hybrid combination of neural network and fuzzy control will produce a powerful representation flexibility and numerical processing capability. This paper proposes the analysis results to verify the effectiveness of the Adaptive Fuzzy-Neuro and ANN controller.

1. 서 론

산업 프로세서의 적용에는 부하 외관, 파라미터 변화 및 어떤 모델의 불확실성 등에 대하여 고성능과 강인성을 발휘할 수 있는 기법이 필요하다. 이러한 문제점을 해결하기 위하여 다양한 연구가 수도되었다.[1-3] 등 다양한 연구가 시도되었다. 이러한 연구들은 간접벡터에 의한 유도전동기의 드라이브 시스템에 적용하여 양호한 성능을 얻을 수 있었다. 그러나 고속 및 저속의 속도변화, 부하 변동, 관성 변화 및 정·역회전 운전 등 다양한 동작에도 더욱 우수한 특성을 얻을 수 있는 연구가 필요하다.

IPMSM의 드라이브 시스템에서 속도와 위치의 정보를 얻기 위하여 엔코더와 리풀버와 같은 센서를 사용한다. 이러한 센서는 값이 비싸고 시스템의 가격을 증가시킨다. 그리고 센서의 정밀도에 영향을 주는 온도, 습도 및 먼지 등 환경적인 요인에 민감하며 시스템의 강인성을 약화시킨다. 이러한 문제점을 해결하기 위하여 센서리스 제어에 관한 연구가 활발히 진행되고 있다.[4]-[6]

본 논문에서는 적용 퍼지-뉴로 및 ANN(Artificial Neural Network)에 의한 IPMSM 드라이브의 전 운전 영역에서 최대토크 제어를 제시한다. 또한 IPMSM 드라이브의 고성능 속도제어를 위하여 적용 퍼지-뉴로 제어기를 설계한다. 그리고 ANN을 이용하여 IPMSM 드라이브의 속도 추정기법을 제시한다. 본 논문에서 제시한 적용 퍼지-뉴로와 ANN 제어기의 제어특성과 추정성능을 분석하고 그 결과를 제시한다.

2. 시스템 구성 및 동작상태

2.1 시스템 구성

동작특성을 분석하기 위한 IPMSM의 미분 방정식은 다음과 같다.[7]

$$p_{i_d} = (v_d - R_i_d + \omega_r L_q i_q) / L_d \quad (1)$$

$$p_{i_q} = (v_q - R_i_q - \omega_r L_d i_d - \omega_r \phi_r) / L_q \quad (2)$$

$$p_{\omega_r} = (T_r - T_L - B\omega_r) / J \quad (3)$$

여기서, 발생토크는 다음 식으로 표현된다.

$$T_r = \frac{3}{2} P [\phi_q i_q + (L_d - L_q) i_d i_q] \quad (4)$$

2.2 동작상태

그림 1은 전동기가 정방향으로 운전될 경우 토크-속도

곡선을 나타낸다.

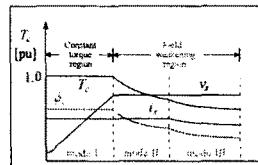


그림 1 정방향 전동기 동작에서 토크-속도 곡선
Fig. 1 Torque-speed curve in forward motoring

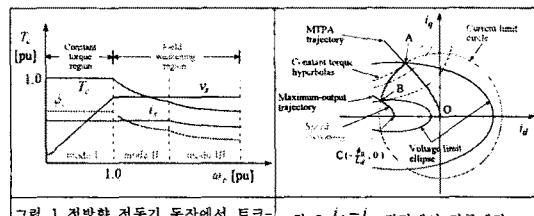


그림 2 $i_d - i_q$ 평면에서 전류궤적
Fig. 2 Current locus in $i_d - i_q$ plane

그림 2은 전류와 전압 한계조건에서 전류궤적을 $i_d - i_q$ 평면에 나타내고 있다.

모드 I : 일정 최대 토크에 의한 전류제한 영역($\omega_r < \omega_1$)

모드 II : 전류와 전압의 제한영역($\omega_1 < \omega_r < \omega_2$)

모드 III : 전압제한 영역($\omega_2 < \omega_r$)

3. 최대 토크제어

3.1 일정 토크영역(CTR)에서 운전

고정자 전류와 전압은 다음과 같이 나타낸다.

$$v_d^2 + v_q^2 = V_s^2 \quad (5)$$

$$i_d^2 + i_q^2 = i_s^2 \quad (6)$$

최대토크가 되기 위한 조건은 토크 식을 d 축 전류로 한변 미분하여 영으로 두면 얻을 수 있다.

$$\frac{\partial T_r}{\partial i_d} = 0 \quad (7)$$

식(7)의 조건에서 i_d 를 구하면 다음과 같다.

$$i_d = \frac{\phi_a}{2(L_q - L_d)} - \sqrt{\frac{\phi_a^2}{4(L_d - L_q)^2} + i_q^2} \quad (8)$$

3.2 약계자 영역(FWR)에서 운전

3.2.1 전압과 전류 한계영역($\omega_1 < \omega_r < \omega_2$)

이 영역은 모드 II에 해당하며 그림 3에서 A점에서 B점까지 일정 전류원을 따라 동작한다.

$$V_0 = \sqrt{v_{d0}^2 + v_{q0}^2} \leq V_{0m} \quad (9)$$

$$I_0 = \sqrt{i_{d0}^2 + i_{q0}^2} \leq I_{0m} \quad (10)$$

식(9)의 조건을 이용하면 식(1)과 (2)에서 다음 식을 얻는다.

$$v_{d0} = -\omega_r L_q i_q \quad (11)$$

$$v_{q0} = \omega_r L_d i_d + \omega_r \phi_a \quad (12)$$

$$V_{0m} = V_{am} - R I_{am} \quad (13)$$

전류의 d 와 q 축 성분은 FWR 영역에서 V_0 가 V_{0m} 과 같은 값으로 유지하기 위하여 제어한다. FWR 영역에

서 i_1 와 i_2 의 관계는 식(11)-(13)을 식(9)에 대입하여 유도할 수 있다.

$$i_d = -\frac{\phi_a}{L_d} + \frac{1}{L_d} \sqrt{\frac{V_{om}^2}{w_r^2} - (L_q i_q)^2} \quad (14)$$

3.2.2 전압제한 영역 ($\omega_2 < \omega_r$)

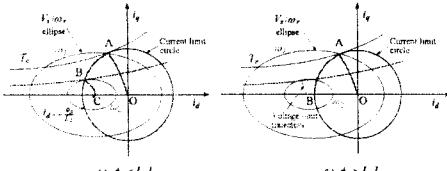


그림 3 전동기의 동작 모드
Fig. 3 Operating mode of motor

그럼 3(a)의 조건이 만족할 경우, 정격전압은 일정 정격전류를 충분하게 발생시킬 수 없으며 속도가 더욱 증가하면 전기자전류를 감소시킨다. 각 동작점에서 일정 최대토크는 V_m/ω 타원에 접선방향으로 궤적이 나타나며 다음 조건을 만족한다.

$$\frac{\partial T_e}{\partial i_d} = 0, \quad \frac{\partial (V_{om}/\omega_r)}{\partial i_d} = 0 \quad (15)$$

식(15)의 조건을 이용하여 i_a 를 구하면 다음과 같다.

$$i_d = \frac{-(2L_d - L_q)\phi_a + L_q\sqrt{\phi_a^2 + 4(L_d - L_q)^2 i_q^2}}{2L_d(L_d - L_q)} \quad (16)$$

FWR 영역에서 모드 Ⅲ는 그림 4의 시스템 블록도에서 i_d 는 식(16)을 사용하여 제어한다.

4. 적응 퍼지-뉴로 제어기의 설계

그럼 4은 퍼지-뉴로 제어기를 설계하고, 적응 퍼지 제어기인 AFC(Adaptive Fuzzy Controller)를 병렬로 연결한다. 퍼지-뉴로에서 나타나는 오차를 보상하기 위하여 AFC를 사용하면 AFC는 기준 모델을 고려한 적응 매개변수들을 나타낸다.

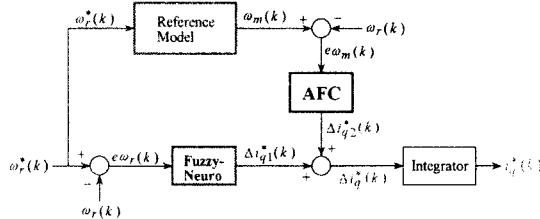


그림 4 제시한 적응 퍼지-뉴로 제어기의 알고리즘

Fig. 4 Algorithm of proposed adaptive fuzzy-neuro controller
 AFC의 입력은 기준모델의 출력과 실제속도의 오차($\epsilon_{w_m}(k)$)와 오차의 변화분($c\epsilon\omega_m(k)$)을 사용한다. 오차와
 오차의 변화분은 다음과 같다.

$$e\omega(k) = \omega(k) = \omega(k) \quad (17)$$

$$ce\varrho_1(k) \equiv e\varrho_1(k) - e\varrho_1(k-1) \quad (18)$$

위의 두 입력은 적응 퍼지의 룰 베이스에 의해 지령 q 죽전류에 보상되는 $\Delta_{q2}^*(k)$ 가 발생된다. 여기서 $\omega_q^*(k)$ 는 기준 모드에 의한 기울기 도수이며, $c_q(k)$ 는 선형 회귀기 속도이다.

보낼에 의한 시장속도이며 $\omega_r(k)$ 은 실제 회전사 속도이다.

$$\dot{f}(k) = \dot{f}(k-1) + \{\Delta^+_{\ell}(k) + \Delta^-_{\ell}(k)\} \quad (12)$$

ANN을 이용한 시스템의 추정에서 구한 IPMSM의 최종 측정속도는 다음 식과 같다 [8].

$$\begin{aligned}\hat{\omega}_r(k+1) &= \hat{\omega}_r(k) + \Delta\hat{\omega}_r(k) \\ &= \hat{\omega}_r(k) - \frac{\Delta W_2(k)}{T} \\ &= \hat{\omega}_r(k) - \frac{\eta}{T} \{ [\phi_q(k) - \hat{\phi}_q(k)] [\hat{\phi}_d(k-1)] \\ &\quad - [\phi_d(k) - \hat{\phi}_d(k)] [\hat{\phi}_q(k-1)] \} - \frac{\alpha}{T} \Delta W_2(k-1)\end{aligned}\tag{20}$$

추정속도를 이용한 회전자 자속의 위치는 다음과 같다.

$$\hat{\theta}_r(k+1) = \hat{\theta}_r(k) + T \cdot \hat{\omega}_r(k) \quad (21)$$

그림 5는 본 논문에서 최종적으로 제시한 적용 퍼지-뉴로와 ANN에 의한 최대토크 제어의 전체 블록도를 나타낸다. 최대토크 제어를 위하여 운전 모드 구간을 세 구간으로 나누고 모드 1은 CTR 동작, 모드 2와 3은 FWR 동작으로 운전한다.

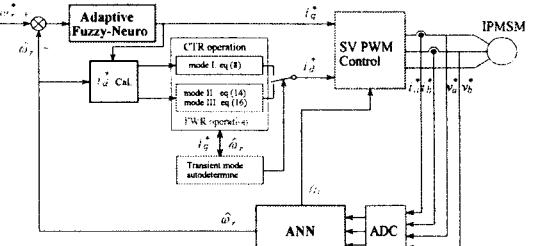


그림 5 적용 퍼지-뉴로와 ANN에 의한 최대토크 제어기의 블록도
 Fig. 5 The block diagram of maximum torque controller with adaptive fuzzy-neuro and ANN

5. 시스템의 성능결과

적용 퍼지-뉴로와 ANN를 적용하여 IPMSM 드라이브의 최대 토크 제어기의 결과를 제시한다.

그림 6는 0.2[sec]에서 자령속도를 1800[rpm]으로 인가 후, 0.6[sec]에서 4000[rpm]으로 운전 중 1.0[sec]에서 부하 토크를 5[N·m]로 스텝 인가하고 1.2[sec]에서 자령속도를 3000[rpm]으로 인가시킨 경우의 응답특성을 나타낸다. FNN과 적응 퍼지-뉴로 제어기의 응답특성을 비교한 결과이다. 그럼 6(a)는 자령속도와 실제속도, 그림 (b)는 q 축 전류, 그림 (c) d 축 전류 및 그림 (d)은 발생 토크를 나타낸다. 적응 퍼지-뉴로 제어기와 FNN 제어기 보다 응답특성이 양호하게 나타나고 있다.

그림 7은 응답특성을 더욱 명확하게 비교하기 위하여 그림 6에서 부하가 인가된 상태에 대한 부분을 확대한 응답특성이다. 적응 퍼지-뉴로 제어기의 속도가 FNN 제어기 보다 오버슈트가 작고 상승시간 및 안정화 시간이 빠르게 나타나고 있다.

그림 8는 무부하 상태에서 $3500[\text{rpm}]$ 으로 운전 중, $1.0\sim1.3[\text{sec}]$ 에서 부하토크를 $5[\text{N}\cdot\text{m}]$ 로 스텝으로 증가할 경우에 나타나는 응답특성이다. 이는 최대토크 제어인 MTPA 제어와 $i_d=0$ 제어의 응답특성을 비교한 결과이다. 그림 9(a)에서 최대속도 $i_d=0$ 제어 보다 안정화 시간이 매우 빠르게 나타나고 있다. 그림 (c)에서 $i_d=0$ 제어는 i_d 가 연속하여 영으로 유지되고 있으나 최대토크 제어에서는 음의 값이 나타나고 있다. 그림 (d)에서 최대 토크 제어가 $i_d=0$ 제어 보다 토크가 매우 크게 나타나고 있다.

그림 9는 관성을 정격의 3배로 증가시킨 상태에서 4상 한 운전 중, $0.7[sec]$ 에서 부하토크를 $3[N\cdot m]$ 인가한 경우의 응답 특성을 나타낸다. 그림 9(a)는 자령속도와 실제 속도, (b)는 추종속도를 나타내며 그림(c)는 d축 전류 및 그림 (d)는 속도오차를 나타낸다. 최대토크 제어는 속도 추정이 양호하게 나타나고 있으나 $i_d = 0$ 제어에서는 속도오차가 크게 나타나고 있다. 추정속도는 실제속도에 양호하게 추정을 하고 있다.

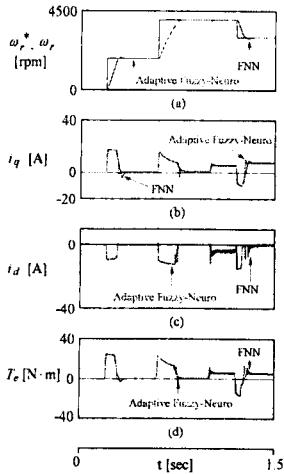


그림 6 속도와 부하토크 변화에 대한 응답특성
Fig. 6 Response characteristics with speed and load torque

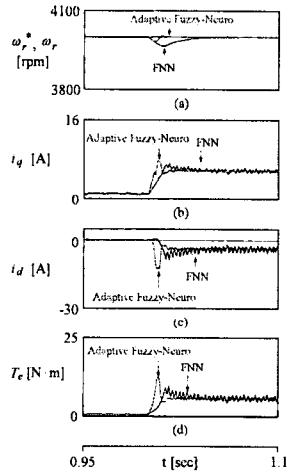


그림 7 부하토크 대한 응답특성
Fig. 7 Response characteristics with load torque

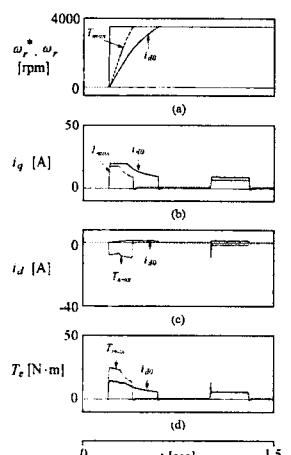


그림 8 속도와 부하 변화에 대한 응답 비교
Fig. 8 Comparison of response with speed change and load torque

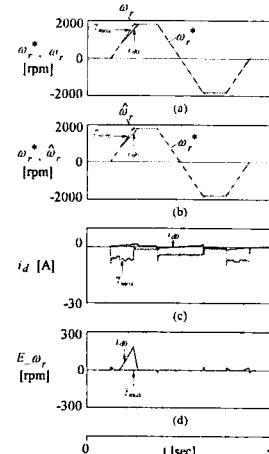


그림 9 4상한 운전에 대한 응답특성
Fig. 9 Response characteristics with quadrant operation

6. 결 론

본 논문에서는 적응 퍼지-뉴로 제어기 및 ANN을 이용하여 IPMSM 드라이브의 최대토크를 제어하기 위하여 d 와 q 축 전류의 죄적 구성을 선정하는 방법을 제시하였다. 속도 및 부하토크가 변동할 경우에도 본 논문에서 제시한 기법이 종래의 i_{dq} 방법보다 매우 양호한 응답특성을 얻을 수 있었다. 본 논문에서 제시한 제어기법이 종래의 i_{dq} 제어 보다 토크를 상승시킬 수 있었으며 CTR에서 MTPA 제어와 FWR에서 약계자 제어 및 MTPA가 양호하게 수행하여 최대토크를 얻을 수 있었다. 또한, 적응 퍼지-뉴로과 ANN을 이용하여 IPMSM의 고성능 속도 제어 및 추정을 제시하였다. 적응 퍼지-뉴로 제어기를 이용하여 속도를 제어하였으며 ANN을 이용하여 속도를 추정하였다. 제시한 적응 퍼지-뉴로 제어기는 종래의 PI 및 FNN 제어기 보다 성능이 우수한 결과를 얻었으며 추정 속도는 실제속도에 양호하게 추정하였다. 따라서 본 논문에서 제시한 제어 기법의 타당성을 입증할 수 있었다.

【참 고 문 헌】

- [1] J. C. Lee, G. T. Park and D. H. Chung, "Speed control and estimation of induction motor using FNN and ANN," The Trans. of KIEE, vol. 42C, no. 6, pp. 77-82, 2006.
- [2] S. M. Nam, J. C. Lee and D. H. Chung, "ANN sensorless control of induction motor with FLC-FNN controller," The Trans. of KIPE, vol. 11, no. 3, pp. 224-232, 2006.
- [3] J. C. Lee, H. G. Lee, Y. S. Lee and S. M. Nam, D. H. Chung, "Speed estimation and control of induction motor drive using hybrid intelligent control," International Conference ICPE'04, no. 3, pp. 181-185, 2004.
- [4] C. Schauder, "Adaptive speed identification for vector control of induction motors," IEEE Trans. on IA, pp. 1054-1061, 1992.
- [5] F. Z. Feng, T. Fukao, "Robust speed identification for speed sensorless vector control of induction motors," IEEE Trans. on IA, vol. 30, no. 5, pp. 1234-1240, 1994.
- [6] H. Kubota and K. Matsuse, "Speed sensorless field oriented control of induction motor with rotor resistance adaption," IEEE Trans. on IA, vol. 30, no. 5, pp. 1219-1224, 1994.
- [7] D. H. Chung, "Power electronics and motor control," Intervision Press, 2005.
- [8] D. H. Chung, et al., "Speed sensorless control of IPMSM drive with ANN," KIEE Trans., vol. 52P, no. 4, pp. 154-160, 2003.