

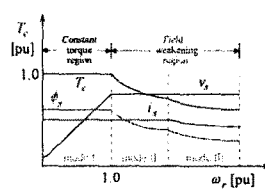
ALM-FNN에 의한 IPMSM 드라이브의 최대토크 제어

이정호*, 최정식, 고재섭, 김종관, 박병상, 박기대, 정동화
 순천대학교 전기제어공학과

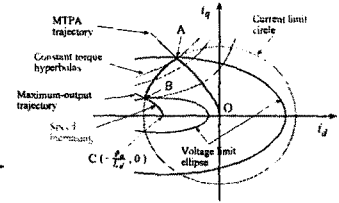
Maximum Torque Control of IPMSM Drive with ALM-FNN

Jung-Ho Lee, Jung-Sik Choi, Jae-Sub Ko, Jong-Kwan Kim, Byung-Sang Park, Ki-Tae Park, Dong-Hwa Chung
 Suncheon national University Major of Electrical Control Engineering

Abstract - The paper is proposed maximum torque control of IPMSM drive using adaptive learning mechanism-fuzzy neural network(ALM-FNN) and artificial neural network (ANN). For each control mode, a condition that determines the optimal d-axis current i_d for maximum torque operation is derived. The proposed control algorithm is applied to IPMSM drive system controlled ALM-FNN and ANN, 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 ALM-FNN and ANN.



<그림 1> 정방향 전동기 동작에서 토크-속도 곡선



<그림 2> i_d-i_q 평면에서 전류궤적

1. 서 론

IPMSM(Interior Permanent Magnet Synchronous Motor)은 토크 및 전력밀도가 높고 고 효율 및 역을 때문에 서보 드라이브의 적용분야에 광범위하게 사용되고 있다.[1] IPMSM은 기계적으로 회전자 구조가 강인하지만 돌극성을 가지고 있으며 비효율적인 공극 때문에 일정 토크영역에서 일정 출력영역까지 광범위하게 운전하기가 어렵다.[2] 특히, 종래의 고정 자속레벨을 사용할 경우, 일정 출력영역에서 속도범위가 매우 낮으며 최대토크를 얻을 수 없다. 일정 출력영역에서 속도를 높이고 최대토크를 발휘할 수 있는 약계자 제어에 관한 연구가 많이 이루어지고 있다.[3][4] 본 논문에서는 ALM-FNN(Adaptive Learning Mechanism-Fuzzy Neural Network) 및 ANN(Artificial Neural Network)에 의한 IPMSM 드라이브의 전 운전 영역에서 최대토크 제어를 제시한다. 최대 토크동작을 위하여 최적 d축 전류를 결정하고 이 전류를 각 제어모드에서 사용한다.

다음은 ALM-FNN를 이용하여 IPMSM 드라이브의 고성능 속도를 제어한다. PI 제어기에서 나타나는 문제점을 해결하기 위하여 신경회로망과 퍼지제어를 혼합 적용한 FNN을 설계한다. 더욱 성능을 개선하기 위하여 학습 메카니즘을 이용하여 FNN 제어기의 파라미터를 갱신시킨다. 그리고 ANN을 이용하여 IPMSM 드라이브의 속도 추정기법을 제시한다. 본 논문에서 제시한 ALM-FNN과 ANN의 제어특성과 추정성능을 분석하고 그 결과를 제시한다.

2. 시스템 구성 및 동작상태

2.1 시스템 구성

동작특성을 분석하기 위한 IPMSM의 미분 방정식 및 발생토크는 다음과 같다.

$$p i_d = (v_d - R i_d + \omega_r L_q i_q) / L_d \tag{1}$$

$$p i_q = (v_q - R i_q - \omega_r L_d i_d - \omega_r \phi_f) / L_q \tag{2}$$

$$p \omega_r = (T_e - T_L - B \omega_r) / J \tag{3}$$

$$T_e = \frac{3}{2} P [\phi_f i_q + (L_d - L_q) i_d i_q] \tag{4}$$

2.2 동작상태

그림 1은 전동기가 정방향으로 운전될 경우 토크-속도 곡선을 나타낸다. 그림 2는 전류와 전압 한계조건에서 전류궤적을 i_d-i_q 평면에 도시하면 성능을 파악할 수 있다.

- 모드 I : 일정 최대 토크에 의한 전류제한 영역($\omega_1 < \omega_r < \omega_2$)
 최대 토크를 위한 최적 전류값과 전류제한에서 동작하는 최대토크를 발생하는 저속영역이다. 이 영역에서는 MTPA(Maximum Torque per Ampere) 제어를 수행한다.
- 모드 II : 전류와 전압의 제한영역($\omega_1 < \omega_r < \omega_2$)
 전동기는 A점에서 B점까지 일정 전류원을 따라 동작한다. 이 영역에서는 일정 전압타원의 크기가 감소하므로 속도는 증가하게 된다.
- 모드 III : 전압제한 영역($\omega_2 < \omega_r$)
 전동기는 일정 토크궤적이 일정 전압타원에 접해 있는 최적조건에서 동작한다. 즉, 토크는 B점 이상의 속도에 대한 각 값에서 최대화가 된다.

3. 최대 토크제어

3.1 CTR에서 운전

CTR는 그림 2에서 모드 I에 해당하며 점 O에서 A까지 동작한다. 고정자 전류와 전압은 다음과 같이 나타낸다.

$$v_d^2 + v_q^2 = V_m^2 \tag{5}$$

$$i_d^2 + i_q^2 = I_m^2 \tag{6}$$

최대토크가 되기 위한 조건은 토크 식을 d축 전류로 한번 미분하여 영으로 두면 얻을 수 있다.

$$\frac{\partial T_e}{\partial i_d} = 0 \tag{7}$$

식(7)의 조건에서 i_d 를 구하면 다음과 같다.

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

3.2 FWR에서 운전

전압 공간벡터에 기초한 PWM 방식을 사용하며 V_{om} 는 $V_{dc} / \sqrt{3}$ 을 사용한다. 전압제한을 방지하기 위하여 요구전압의 크기를 제한치 내에서 동작하도록 하고 기준전류의 발생은 d축 전류를 감소시켜야 한다.

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. 전류와 전압조건은 다음과 같이 나타낸다.

$$V_o = \sqrt{v_{d0}^2 + v_{q0}^2} \leq V_{om} \tag{9}$$

$$I_o = \sqrt{i_{d0}^2 + i_{q0}^2} \leq I_{om} \tag{10}$$

식(9)의 조건을 이용하면 식(1)과 (2)에서 다음 식을 얻는다.

$$v_{d0} = -\omega_r L_q i_q \tag{11}$$

$$v_{q0} = \omega_r L_d i_d + \omega_r \phi_f \tag{12}$$

$$V_{om} = V_{am} - R I_{om} \tag{13}$$

FWR 영역에서 i_d 와 i_q 의 관계는 식(11)-(13)을 식(9)에 대입하여 유도할 수 있다.

$$i_d = -\frac{\phi_f}{L_d} + \frac{1}{L_d} \sqrt{\frac{V_{om}^2}{\omega_r^2} - (L_q i_q)^2} \tag{14}$$

여기서 $|i_q| \leq V_{om} / (\omega_r L_q)$, i.e., $|v_{d0}| \leq V_{om}$ 이다.

3.2.2 전압제한 영역($\omega_2 < \omega_r$)

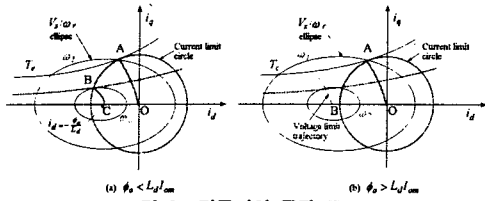
이 영역은 그림 2의 모드 III에 해당하며 두 조건을 고려해야 한다. 그림 3(a)의 조건이 만족할 경우, 각 동작점에서 일정 최대토크는 V_{om} / ω_r 타원에 접선방향으로 궤적이 나타나며 다음 조건을 만족한다.

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

식(15)의 조건을 이용하여 i_d 를 구하면 다음과 같다.

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

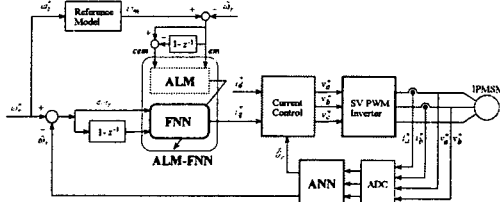
FWR 영역에서 모드 III는 그림 3의 시스템 블록도에서 i_d^* 는 식(16)을 사용하여 제어한다.



〈그림 3〉 전동기의 동작 모드

4. ALM-FNN과 ANN 설계

IPMSM 드라이브 시스템을 위한 ALM-FNN 및 ANN은 그림 6과 같다.



〈그림 4〉 ALM-FNN 및 ANN에 의한 드라이브 시스템

FNN 제어기에 학습 매카니즘을 적용하여 룰 베이스의 규칙을 수정한다.

$$em(kT) = \omega_m(kT) - \hat{\omega}_s(kT) \quad (17)$$

$$cem(kT) = em(kT) - em(kT - T) \quad (18)$$

지식베이스의 수정자는 $p(kT)$ 에 따라서 FNN 제어기의 지식베이스를 변화시킨다. 이 변화는 FNN 제어기에서 출력의 멤버십 함수의 증감을 수정하여 구현한다.

$$C_i(kT) = C_i(kT - T) + p(kT) \quad (19)$$

여기서 첨자 i 는 역모델에 의해 동작하는 i 번째 멤버십 함수를 나타낸다.

5. ANN에 의한 속도 추정

ANN을 이용한 시스템의 추정에서 구한 IPMSM의 최종 추정속도는 다음 식과 같다.

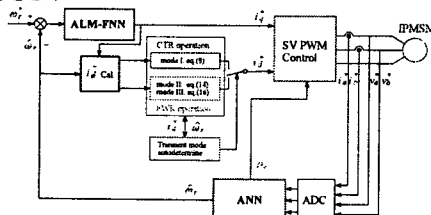
$$\begin{aligned} \hat{\omega}_s(k+1) &= \hat{\omega}_s(k) + \Delta \hat{\omega}_s(k) \\ &= \hat{\omega}_s(k) - \frac{\Delta W_2(k)}{T} \\ &= \hat{\omega}_s(k) - \frac{\eta}{T} \{ [\hat{\phi}_d(k) - \hat{\phi}_d(k-1)] [\hat{\phi}_s(k-1)] - [\hat{\phi}_d(k) - \hat{\phi}_d(k-1)] [\hat{\phi}_s(k-1)] \}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

여기서 T 는 샘플링 주기를 나타내며 η 는 학습계수이며 계수 α 는 현재 하중에서 변동하는 과거 하중의 영향이다.

추정속도를 이용한 회전자 자속의 위치는 다음과 같다.

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

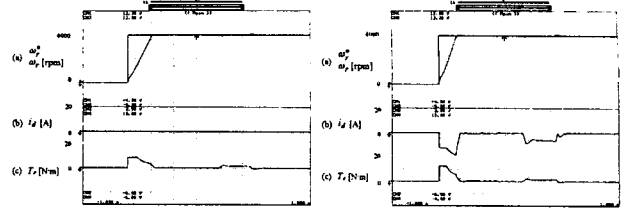
그림 5는 본 논문에서 최종적으로 제시한 ALM-FNN과 ANN에 의한 최대토크 제어의 전체 블록도를 나타낸다. 최대토크 제어를 위하여 운전 모드 구간을 세 구간으로 나누고 모드 I은 CTR 동작, 모드 II와 III는 CPR 동작으로 운전한다.



〈그림 5〉 ALM-FNN과 ANN에 의한 최대토크 제어기의 블록도

6. 시스템의 성능결과

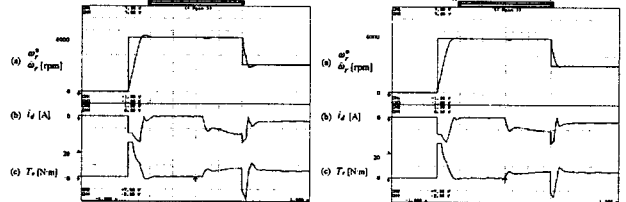
그림 6과 그림 7은 무부하 상태에서 스텝 지령속도를 4000[rpm]으로 운전 중, 부하토크를 4[N·m]인가 시켰을 경우의 $i_d = 0$ 와 최대토크 제어의 응답특성을 나타낸다. 무부하 상태에서 스텝 지령속도에 대한 응답특성을 비교하면 최대토크 제어는 $i_d = 0$ 제어에 비해 오버슈트가 적고 상승 시간이 짧으며 정상상태에 빠르게 도달한다. 그리고 최대토크 제어는 토크도 $i_d = 0$ 제어에 비해 크게 나타난다.



〈그림 6〉 스텝 지령속도에 대한 $i_d = 0$ 제어의 응답특성

〈그림 7〉 스텝 지령속도에 대한 최대토크 제어의 응답특성

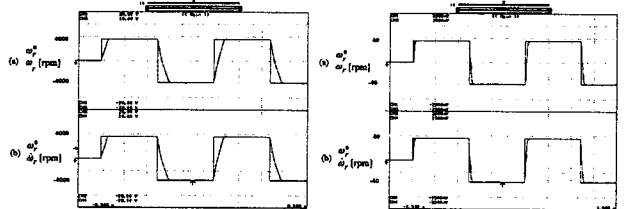
그림 8과 그림 9는 무부하 상태에서 4000[rpm]으로 운전 중, 부하토크를 4[N·m]인가하여 3000[rpm]으로 운전속도를 변화시켰을 경우 FNN과 ALM-FNN의 응답특성을 나타낸다. ALM-FNN제어의 응답성능은 FNN 제어기 보다 상승 시간이 짧으며 속도 추종이 양호하게 나타난다.



〈그림 8〉 지령속도 변화와 부하인가에 대한 FNN의 응답특성

〈그림 9〉 지령속도 변화와 부하인가에 대한 ALM-FNN의 응답특성

그림 10은 무부하 상태에서 4000[rpm]과 -4000[rpm]을 교대로 운전시켰을 경우 최대토크 제어의 응답특성을 나타낸다. 그림 11은 저속인 40[rpm]으로 운전하였을 때 응답특성이다. 고속 및 저속 운전에서도 속도 추종은 양호하게 이루어지고 있다. 따라서 ANN에 의한 속도추종은 양호하게 나타나는 결과를 얻을 수 있었다.



〈그림 10〉 스텝 지령속도 변화에 최대토크 제어의 응답특성

〈그림 11〉 스텝 지령속도 변화에 최대토크 제어 응답특성

7. 결론

본 논문에서는 ALM-FNN 제어기를 이용하여 IPMSM 드라이브의 최대토크를 제어하기 위하여 d 와 q 축 전류의 최적 구성을 선정하는 방법을 제시하였다. 저속도 이하인 저속에서는 MTPA 제어가 가능하였고 고속에서는 약제자 제어 및 MTPA 제어가 가능하였다. 속도 및 부하토크가 변동할 경우에도 본 논문에서 제시한 기법이 종래의 i_{d0} 방법보다 매우 양호한 응답특성을 얻을 수 있었다. 따라서 저속과 고속의 전 속도영역에서 본 논문에서 제시한 방법이 우수한 응답특성의 결과를 얻을 수 있었다. 본 논문에서 제시한 제어기법이 종래의 i_{d0} 제어 보다 토크를 상승시킬 수 있었으며 CTR에서 MTPA 제어와 FWR에서 약제자 제어 및 MTPA가 양호하게 수행하여 최대토크를 얻을 수 있었다.

또한, ALM-FNN과 ANN을 이용하여 IPMSM의 고성능 속도 제어 및 추정을 제시하였다. ALM-FNN 제어기를 이용하여 속도를 제어하였으며 ANN을 이용하여 속도를 추정하였다.

본 논문에서는 제시한 ALM-FNN 제어기를 이용한 IPMSM 드라이브의 최대토크 제어를 이룩할 수 있었으며 속도의 제어 및 추정도 만족할만한 결과를 얻을 수 있었다. 따라서 본 논문에서 제시한 제어 기법의 타당성을 입증할 수 있었다.

〈참고 문헌〉

- [1] G. R. Slemon, "Electric machines and drives," Reading, MA: Addison-Wesley, 1992.
- [2] Mona N. Eskander, "Minimization of Losses in Permanent Magnet Synchronous Motors Using Neural Network", Journal of Power Electronics, vol. 2, no. 3, pp 220-229, 2002.
- [3] S. R. MacMinn and T. M. Jahns, "Control techniques for improved performance of interior PM synchronous motor drives," IEEE Trans. IA., vol. 27, pp. 997-1004, 1991.
- [4] S. Morimoto, M. Sanada and Y. Taketa, "Wide speed operation of interior permanent magnet synchronous motors with high performance current regulator," IEEE Trans. IA., vol. 30, pp. 920-926, 1994.