

ALM-FNN 및 MFC 제어를 이용한 IPMSM의 최대토크 제어

정병진*, 고재섭, 최정식, 정철호, 김도연, 정동화
 순천대학교 공과대학 정보통신공학부

Maximum Torque Control of IPMSM using ALM-FNN and MFC Controller

Byung-Jin Jung·Jae-Sub Ko·Jung-Sik Choi·Chul-Ho Jung·Do-Yeon Kim·Dong-Hwa Chung
 School of Information & Communication Engineering, Suncheon National Univ.

Abstract - This paper proposes maximum torque control of IPMSM drive using adaptive learning mechanism-fuzzy neural network (ALM-FNN) controller, model reference adaptive fuzzy control(MFC) and artificial neural network(ANN). This control method is applicable over the entire speed range which considered the limits of the inverter's current and voltage rated value. For each control mode, a condition that determines the optimal d-axis current i_d for maximum torque operation is derived. This paper considers the design and implementation of novel technique of high performance speed control for IPMSM using ALM-FNN, MFC and ANN controller. The proposed control algorithm is applied to IPMSM drive system controlled ALM-FNN, MFC and ANN controller, the operating characteristics controlled by maximum torque control are examined in detail. Also, this paper proposes the analysis results to verify the effectiveness of the ALM-FNN, MFC and ANN controller.

1. 서 론

최근, IPMSM(Interior Permanent Magnet Synchronous Motor)은 토크 및 전력밀도가 높고 고 효율과 역률, 저 노이즈와 강인성 동작과 같은 양호한 특성 때문에 고성능 드라이브의 적용분야에 매우 호응을 얻고 있다[1]. IPMSM은 기계적으로 회전자 구조가 강인하지만 돌극성을 가지고 있으며 비 효율적인 공극 때문에 일정 토크영역에서 일정 출력영역까지 광범위하게 운전하기가 어렵다[3]. 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 [4]-[5]. 본 논문에서는 ALM-FNN (Adaptive Learning Mechanism-Fuzzy Neural Network) 제어기는 IPMSM의 속도를 제어하고 출력성분인 지령토크를 이용하여 최대토크 제어를 수행한다. 최대 토크동작을 위하여 최적 d축 전류를 결정하고 이 전류를 각 제어모드에서 사용한다. 그리고 MFC(Model Reference Adaptive-Fuzzy Control) 제어기는 전류를 제어하고 ANN(Artificial Neural Network)을 이용하여 IPMSM의 속도를 추정한다. IPMSM 드라이브 시스템을 구성하여 제시한 제어를 적용하여 다양한 성능과 최대토크의 특성을 분석한다. 그리고 본 논문의 효용성을 입증하기 위하여 종래의 방식과 비교하고 결과를 제시한다.

2. 시스템 구성 및 동작상태

2.1 시스템 구성

동작특성을 분석하기 위한 IPMSM의 미분 방정식은 다음과 같다.

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

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

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

여기서, 발생토크는 다음 식으로 표현된다.

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

2.2 동작상태

그림 1은 전동기가 정방향으로 운전될 경우 토크-속도 곡선을 나타낸다.

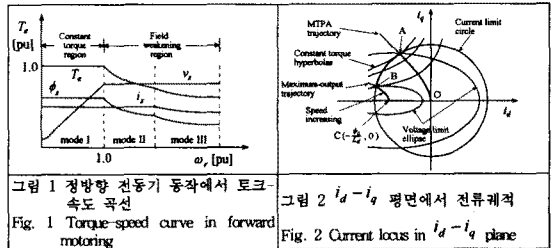


그림 1 정방향 전동기 동작에서 토크-속도 곡선
 Fig. 1 Torque-speed curve in forward motoring

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.

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

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

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.

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

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.

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

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

식(9)의 조건을 이용하면 식(1)과 (2)에서 다음 식을 얻는다.

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

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

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

전류의 d 와 q 축 성분은 FWR 영역에서 V_0 가 V_{0m} 과 같은 값으로 유지하기 위하여 제어한다. FWR 영역에서 i_d 와 i_q 의 관계는 식(11)-(13)을 식(9)에 대입하여 유도할 수 있다.

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

3.2.2 전압제한 영역 ($\omega_2 < \omega_r$)

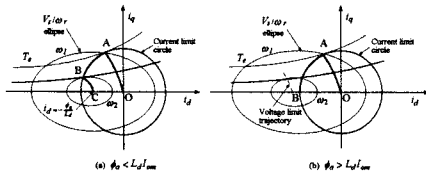


그림 3 전동기의 동작 모드
Fig. 3 Operating mode of motor

그림 3(a)의 조건이 만족할 경우, 정격전압은 일정 정격 전류를 충분히 발생시킬 수 없으며 속도가 더욱 증가하면 전기자전류를 감소시킨다. 각 동작점에서 일정 최대토크는 V_{om}/ω_r 타원에 접선방향으로 궤적이 나타나며 다음 조건을 만족한다.

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

식(15)의 조건을 이용하여 i_d 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. 제시한 제어 시스템 구성

IPMSM 드라이브 시스템을 위한 ALM-FNN, MFC 제어기 및 ANN의 구조는 그림 4와 같다.

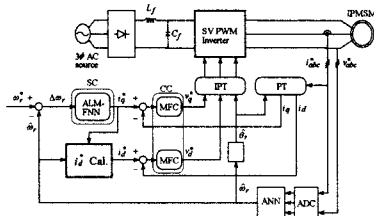


그림 4 제시한 IPMSM의 제어 시스템
Fig. 4 Proposed control system of IPMSM

그림 5는 학습 메카니즘을 이용한 FNN 제어기인 ALM-FNN의 구조를 나타낸다. FNN 제어기에 학습 메카니즘을 적용하여 룰 베이스의 규칙을 수정한다. 학습 메카니즘은 퍼지 역모델 및 지식베이스 수정자를 포함한다. 드라이브 시스템의 속도성능은 기준모델의 속도와 추정속도의 오차에 의해 좌우된다.

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

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

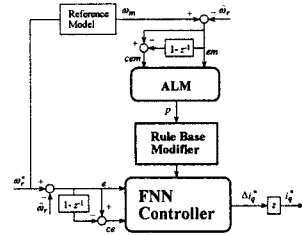


그림 5 학습 메카니즘에 의한 FNN 제어기
Fig. 5 FNN controller with learning algorithm

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

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

여기서 첨자 i 는 역모델에 의해 동작하는 i 번째 멤버십 함수를 나타낸다. 여기서 각 부분 변화는 각 시간에서 이루어진다. 이 방법에서 FNN 제어기는 요구되는 $i_{qs}^*(kT)$ 를 발생하기 위하여 강제화 시킨다. 이는 기준모델을 추종하도록 전동기를 제어한다.

적용 시스템의 적응과정은 2개의 퍼지제어기로 동작한다. 그림 6은 두 개의 퍼지동작의 상호작용을 나타내며 DFC(Direct Fuzzy Controller)는 종래의 일반적인 퍼지제어기이고 AFC는 기준 모델을 고려한 적응 퍼지제어기를 나타낸다.

DFC 알고리즘에 의한 출력은 $\Delta i_{q1}^*(k)$ 이며 AFC에 의한 출력은 $\Delta i_{q2}^*(k)$ 이다. 이 두 출력을 합하여 적분기를 통해 지령 q 축 전류를 얻는다.

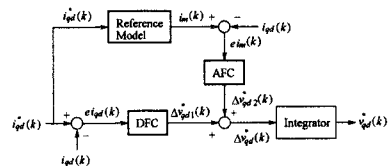


그림 6 MFC 제어기
Fig. 6 MFC controller

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

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

추정속도를 이용한 회전자 자속의 위치는 다음과 같다.

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

5. 시스템의 성능결과

그림 7은 지령속도 및 부하토크변화에 대한 응답특성을 나타낸다. 지령속도를 1800[rpm] → 3000[rpm] → 4000[rpm] 운전 중 부하토크를 5[N.m]인가하였을 경우 응답특성을 나타낸다. 그림 8은 그림 7을 명확하게 검토하기 위하여 부하토크 변화 부분을 확대하여 해석한 결과를 나타낸다. ALM-FNN 제어기가 FNN 제어기에 비하여 오버슈트가 작고, 빠르게 안정화되어 우수한 성능이 나타난다.

그림 9는 최대토크 제어와 $i_d = 0$ 제어의 응답특성을 비

교한 결과이다. 0.2[sec]에 2000[rpm]으로 운전중 지령속도를 0.6[sec]에 3000[rpm]으로 변화시키고, 1.2[sec]에서 1.4[sec] 사이에 부하토크를 5[N.m] 증가하였을 경우 응답 특성을 나타낸다. 그림 9(a)는 지령속도와 추정속도, 그림 9(b)는 q 축 전류, 그림 9(c)는 d 축 전류, 그림 9(d)는 발생 토크를 나타낸다. 그림 9(c)에서 d 축 전류전류가 음의 값이 나타나고 있으며 그림 9(d)에서 토크가 매우 크게 증가하고 있다.

그림 10은 ANN에 의한 속도추정을 나타낸다. 그림 10(a)는 지령속도와 실제속도, 그림 10(b)는 지령속도와 추정속도, 그림 10(c)는 실제속도와 추정속도 오차를 나타낸다. 그림 10(c)에서 추정오차가 1% 이내로 매우 양호하게 나타나고 있다.

그림 11은 부하변화에 대한 전류제어 응답특성을 비교하여 나타낸 것이다. 그림 11(가)은 PI 제어기의 응답특성, 그림 11(나)는 MFC 제어기의 응답특성을 나타낸다. 또한 각 그림의 (a)는 부하변화에 대한 속도응답, (b)는 a 상 지령전류와 실제전류, (c)는 전류오차 및 (d)는 a 상의 스위칭 시간을 나타낸다. 부하변화에 대한 과도응답 부분에서 MFC 제어기는 PI 제어기에 비해 오버슈트 및 안정화 시간이 짧으며, 전류 오차가 작게 나타나고 있다.

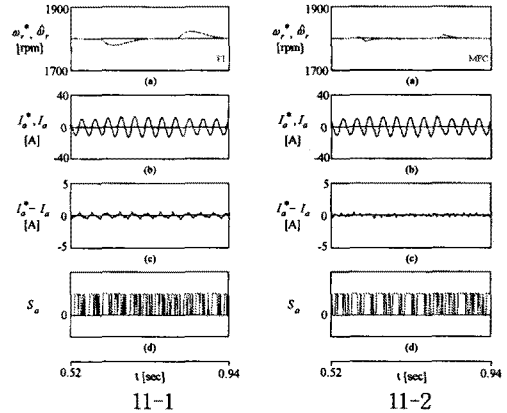


그림 11. 부하변화에 대한 전류제어 응답특성 비교
Fig. 11. response characteristic comparison of current control with load torque variation

6. 결론

본 논문에서는 IPMSM의 최대토크 제어를 위하여 ALM-FNN 및 MFC 제어기를 제시하였다. 전 속도영역에서 최대토크제어를 위한 최적의 d 와 q 축 전류를 선정하는 방법을 제시하였다. 속도 및 부하토크가 변동할 경우에도 본 논문에서 제시한 기법이 종래의 i_{d0} 방법보다 매우 양호한 응답특성을 얻을 수 있었다. 또한 본 논문에서 제시한 ALM-FNN 제어기는 FNN 제어기에 비하여 지령속도 및 부하토크 변화에 대해서도 양호한 성능을 나타냈고 ANN에 의한 속도추정도 1% 이내로 우수한 추정 성능을 나타냈다. MFC는 기존모델을 고려한 AFC와 DFC를 혼합한 형태이며, MFC를 이용하여 전류를 제어하였다. MFC 제어기는 종래의 PI 제어기 보다 전류제어 성능이 우수한 결과를 얻을 수 있었다. 따라서 본 논문에서 제시한 제어 기법의 타당성을 입증할 수 있었다.

[참고 문헌]

- [1] C. K. Lin, T. H. Liu and C. H. Lo, "High performance sensorless IPMSM drive with a wide adjustable speed range," IECON 2008. 34th Annual Conference of IEEE, pp. 1222-1227, 2008.
- [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] B. K. Bose and P. M. Szczesny, "A microcomputer-based control and simulation of an advanced IPM synchronous machines drive system for electric vehicle propulsion," IEEE Trans. IE, vol. 35, no. 4, pp. 547-559, 1988.
- [4] T. M. Jahns, "Flux weakening regime operation of an interior permanent magnet synchronous motor drive," IEEE Trans. IA, vol. 23, no. 4, pp. 681-689, 1987.

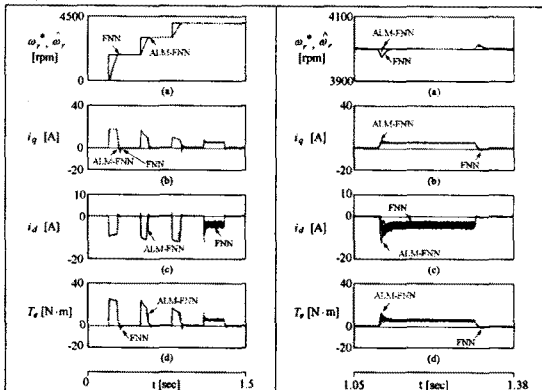


그림 7 지령속도 및 부하토크 변화에 대한 응답특성
Fig. 7 Response characteristic with command and load torque variation

그림 8 지령속도 및 부하토크 변화에 대한 응답특성
Fig. 8 Response characteristic with command and load torque variation

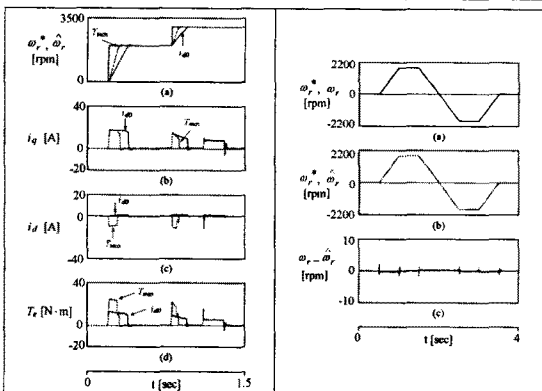


그림 9 지령속도 및 부하토크 변화에 대한 응답특성
Fig. 9 Response characteristic with command and load torque variation

그림 10. 속도 추정에 대한 응답특성
Fig. 10. Response characteristics with speed estimation