

ALM-FNN 제어기에 의한 IPMSM의 최대토크 제어

남수명, 고재섭, 최정식, 박병상, 정동화
 순천대학교 공과대학 정보통신공학부

Maximum Torque Control of IPMSM with ALM-FNN Controller

Su-Myeong Nam, Jae-Sub Ko, Jung-Sik Choi, Bung-Sang Park, Dong-Hwa Chung
 School of Information & Communication Engineering, Suncheon National Univ.

Abstract - The paper is proposed maximum torque control of IPMSM drive using adaptive learning mechanism-fuzzy neural network (ALM-FNN) 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-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 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 ALM-FNN and ANN controller.

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.

IPMSM은 기계적으로 회전자 구조가 강인하지만 돌극성을 가지고 있으며 비 효율적인 광극 때문에 일정 토크 영역에서 일정 출력영역까지 광범위하게 운전하기가 어렵다.[1] 특히, 종래의 고정 자속레벨을 사용한 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.[2]-[3]

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 d 축 전류를 결정하고 이 전류를 각 제어모드에서 사용한다.

2. 시스템 모델링 및 동작상태

2.1 시스템 모델링

동작특성을 분석하기 위한 IPMSM의 미분 방정식은 다음과 같다.

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

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

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

여기서, 발생토크는 다음 식으로 표현된다.

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

2.2 동작상태

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

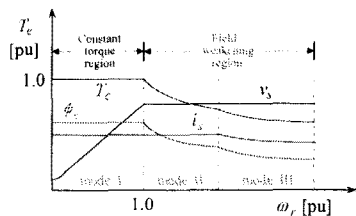


그림 1 정방향 전동기 동작에서 토크-속도 곡선

정방향 전동기의 운전영역을 일정 토크영역(CTR: Constant Torque Region = 모드 I)과 약계자 영역(FWR: Field Weakening Region = 모드II,III)으로 분류한다. 그림 2는 전류와 전압 한계조건에서 전류계좌를 $i_d - i_q$ 평면에 도시하면 성능을 파악할 수 있다.

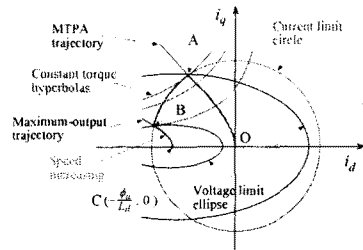


그림 2 $i_d - i_q$ 평면에서 전류계좌

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($\omega_r < \omega_2$)

3. 최대 토크제어

3.1 CTR에서 운전

CTR는 그림 2에서 모드 I에 해당하며 점 O에서 A까지 동작하고 속도는 영역에서 인버터의 이용 가능한 최대 출력전압으로 정의된 기저속도까지 확장한다.

IPMSM의 돌극성이 있는 전동기는 $L_d < L_q$ 의 조건이 있으므로 리터런스 토크를 이용한다. CTR 영역에서는

MTPA를 발생하기 위하여 전류벡터를 제어한다.
고정자 전류와 전압은 다음과 같이 나타낸다.

$$v_d^2 + v_q^2 = v_s^2 \quad (5) \quad i_d^2 + i_q^2 = i_s^2 \quad (6)$$

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

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

식(7)의 조건에서 i_d 를 구하면 다음과 같다.

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

3.2 FWR에서 운전

인버터에서 전동기에 공급되는 최대전압 V_{0m} 는 베타리 전압과 PWM 방식에 의해 제한된다. 전압 공간벡터에 기초한 PWM 방식을 사용하며 V_{0m} 는 $V_{dc}/\sqrt{3}$ 을 사용한다.

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

이 영역은 모드 II에 해당하며 그림 2에서 A점에서 B점까지 일정 전류원을 따라 동작한다. 제어 알고리즘을 간단하게 처리하기 위하여 전류와 전압조건은 다음과 같이 나타낸다.

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

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

식(9)의 조건을 이용하면 식(1)과 (2)에서 다음 식을 얻는다.

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

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

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

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.

$$i_d = -\frac{\phi_a}{L_d} + \frac{1}{L_d} \sqrt{\frac{V_{0m}^2}{\omega_r^2} - (L_q i_q)^2} \quad (14)$$

여기서 $|i_q| \leq V_{0m} / (\omega_r L_q)$, i.e. $|v_{d0}| \leq V_{0m}$ 이다.

전류벡터가 식(14)에 의해 제어되면 실제 단자전압 V_a 는 정상상태에서 V_{0m} 내에서 항상 유지되어야 한다. 기저 속도를 초과하여 FWR 영역으로 진입하면 i_d^* 는 식(14)를 사용하여 제어한다.

3.2.2 전압제한 영역 ($\omega_2 < \omega_r$)

이 영역은 그림 3의 모드 III에 해당하며 두 조건을 고려해야 한다. 그림 5는 전동기의 동작모드를 나타내며

그림(a)는 $\phi_a < L_d I_{0m}$ 의 조건이 만족될 경우, 그림(b)는 $\phi_a > L_d I_{0m}$ 의 조건에 해당하는 경우를 나타낸다.

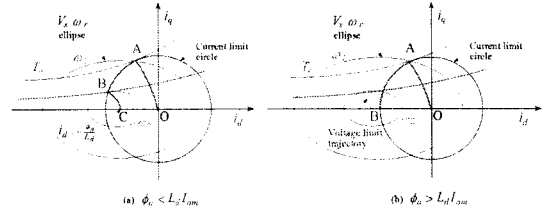


그림 3 전동기의 동작 모드

그림 3(a)의 조건이 만족할 경우, 정격전압은 일정 정격전류를 충분히 발생시킬 수 없으며 속도가 더욱 증가하면 전기자전류를 감소시킨다. 각 동작점에서 일정 최대토크는 V_{0m}/ω_r 타원에 접선방향으로 케적이 나타나며 다음 조건을 만족한다.

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

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 III에서 i_d^* 는 식(16)을 사용하여 제어한다.

모드 I은 식(8), 모드 II는 식(14) 및 모드 III는 식(16)을 사용하며 식(8)의 i_d 를 i_{d1} 이라고 하고 식(14)은 i_{d2} 및 식(16)은 i_{d3} 라고 가정한다. 제어 알고리즘은 다음과 같다.

- ① 지령 q 축 전류 i_q^* 와 추정속도 $\hat{\omega}_r$ 를 입력받아 i_{d1} , i_{d2} 및 i_{d3} 는 각각 식(8), 식(14) 및 식(16)에 의하여 계산한다.
- ② 기저속도 이하에서는 요구되는 출력전압이 정격전압보다 작다. i_{d2} 가 정격전압과 일치하기 때문에 i_{d1} 은 i_{d2} 보다 작게 된다. 따라서 조건 $i_{d1} \leq i_{d2}$ 에서는 모드 I에서 동작하고 지령 d 축 전류 i_d^* 는 i_{d1} 이 된다.
- ③ 기저속도 이상으로 속도가 증가할 경우에는 전동기를 동작시키기 위하여 가능한 모드가 모드 II와 모드 III이다. i_{d2} 와 i_{d3} 가 조건 $i_{d3} \leq i_{d2}$ 을 만족한다면 전동기는 모드 II에서 동작하고 지령 d 축 전류 i_d^* 는 i_{d2} 가 된다. 그러나 이와는 반대로 조건 $i_{d3} \leq i_{d2}$ 을 만족하지 않을 경우에는 전동기는 모드 III에서 동작하고 지령 d 축 전류 i_d^* 는 i_{d3} 가 된다.

4. ALM-FNN 제어기

FNN 제어기는 드라이브 시스템의 동작을 관측하고 요구되는 지령치로 실제 성능을 비교한다. 학습 매카니즘은 요구되는 시스템 동작으로 거의 일치시키기 위하여 FNN 제어를 수정한다. FNN의 입력은 속도오차 e 및 속도오차의 변화분 ce 이다. FNN의 출력 Δi_q^* 는 중

심 비퍼지화 방법에 의해 계산한다. 이전 출력 $i_q^*(k-1)$ 에 출력 $\Delta i_q^*(k)$ 를 합하여 최종 $i_q^*(k)$ 를 얻고 이를 전동기의 입력으로 한다.

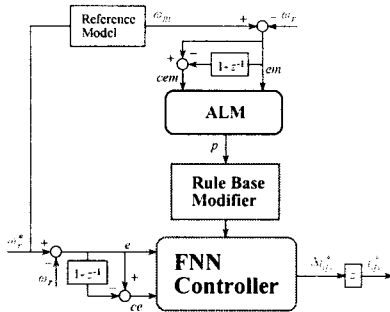


그림 4 학습 매카니즘에 의한 FNN 제어기

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

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

5. ANN에 의한 속도 추정

ANN을 이용한 시스템의 추정에서 구한 IPMSM의 최종 추정속도는 다음 식과 같다.[4]

$$\begin{aligned} \hat{\omega}_r(k+1) &= \hat{\omega}_r(k) + \Delta \hat{\omega}_r(k) \\ &= \hat{\omega}_r(k) - \frac{\Delta W_2(k)}{T} \\ &= \hat{\omega}_r(k) - \frac{\eta}{T} \{ [\hat{\phi}_q(k) - \hat{\phi}_q(k)] [\hat{\phi}_d(k-1)] - [\hat{\phi}_d(k) - \hat{\phi}_d(k)] [\hat{\phi}_q(k-1)] \} \\ &\quad - \frac{\alpha}{T} \Delta W_2(k-1) \end{aligned} \quad (18)$$

추정속도를 이용한 회전자 자속의 위치는 다음과 같다.

$$\hat{\theta}_r(k+1) = \hat{\theta}_r(k) + T \cdot \hat{\omega}_r(k) \quad (19)$$

그림 5는 본 논문에서 최종적으로 제시한 LM-FNN과 ANN에 의한 최대토크 제어의 전체 블록도를 나타낸다.

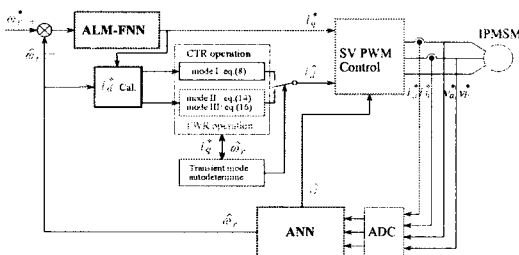


그림 5 제시한 시스템의 전체 블록도

6. 시스템의 성능 결과

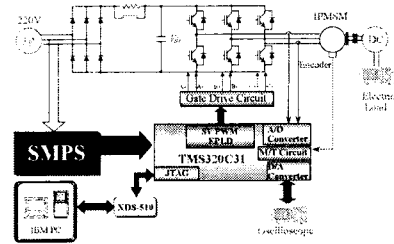


그림 6 IPMSM 드라이브 시스템의 구성도

그림 7과 그림 8은 무부하 상태에서 스텝 지령속도로 4000[rpm]으로 운전 중, 부하토크를 4[N·m]인가 시켰을 경우의 $i_d=0$ 와 최대토크 제어의 응답특성을 나타낸다. 그림 (a)는 지령속도와 실제속도, 그림 (b)는 d 축 전류를 나타내고 그림 (c)는 발생토크를 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 9와 그림 10은 무부하 상태에서 4000[rpm]으로 운전 중, 3000[rpm]으로 운전속도를 변화시켰을 경우 $i_d=0$ 와 최대토크 제어의 응답특성을 나타낸다. 속도를 변화시켰을 경우에도 최대토크 제어는 $i_d=0$ 제어에 비해 속도 변화의 폭이 감소하고 지령속도에 빠르게 도달하는 것을 알 수 있다.

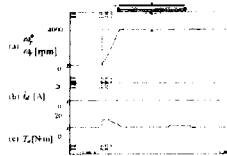


그림 7 스텝 지령속도에 대한 $i_d=0$ 제어의 응답특성

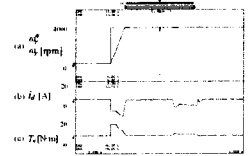


그림 8 스텝 지령속도에 대한 최대토크 제어의 응답특성

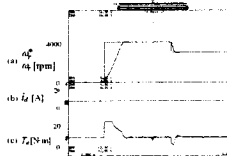


그림 9 지령속도 변화에 대한 $i_d=0$ 제어의 응답특성

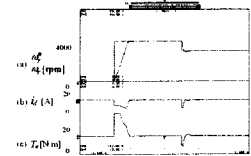


그림 10 지령속도 변화에 대한 최대토크 제어의 응답특성

그림 11과 그림 12은 무부하 상태에서 4000[rpm]으로 운전 중, 3000[rpm]으로 운전속도를 변화시켰을 경우 FNN 과 ALM-FNN의 응답특성을 나타낸다. 그림 (a)는 지령속도와 추정속도, 그림 (b)는 d 축 전류를 나타내고 그림 (c)는 발생토크를 나타낸다. 무부하 상태에서 스텝 지령속도에 대한 응답특성을 비교하면 ALM-FNN은 FNN에 비해 오버슈트가 적고 상승 시간이 짧으며 정상상태에 빠르게 도달한다.

그림 13과 그림 14은 무부하 상태에서 4000[rpm]으로 운전 중, 부하토크를 4[N·m]인가하여 3000[rpm]으로 운전속도를 변화시켰을 경우 FNN 과 ALM-FNN의 응답

특성을 나타낸다. 부하를 인가한 경우에도 ALM-FNN 제어기의 응답성능은 FNN 제어기 보다 상승 시간이 빠르며 속도 추종이 양호하게 나타난다.

그림 15와 그림 16은 다양한 속도변화에 대한 응답변화로 무부하 상태에서 운전속도를 0[rpm]-2000[rpm]-4000[rpm]-4000[rpm]-0[rpm]로 운전속도를 변화하였을 때 FNN과 ALM-FNN의 응답특성을 나타낸다. 다양한 속도변화에서도 ALM-FNN 제어기는 FNN 제어기에 비해 오버슈트가 적고 상승 시간이 빠르며 정상상태에 빠르게 도달한다.

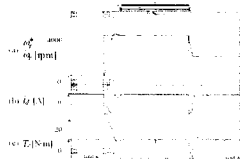


그림 11 지령속도 변화에 대한 FNN의 응답특성

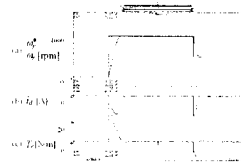


그림 12 지령속도 변화에 대한 ALM-FNN의 응답특성

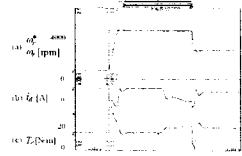


그림 13 지령속도 변화와 부하인가에 대한 FNN의 응답특성

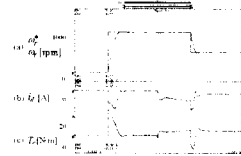


그림 14 지령속도 변화와 부하인가에 대한 ALM-FNN의 응답특성

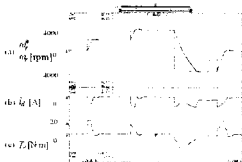


그림 15 스텝 지령속도에 변화에 대한 FNN의 응답특성

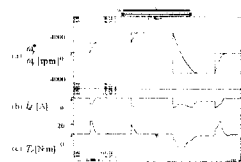


그림 16 스텝 지령속도에 변화에 대한 ALM-FNN의 응답특성

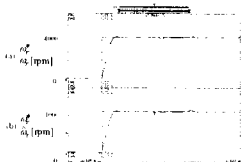


그림 17 스텝 지령속도에 변화에 대한 최대토크 제어의 응답특성



그림 18 스텝 지령속도 변화에 최대토크 제어의 응답특성

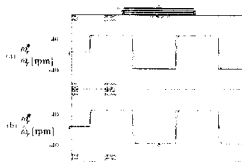


그림 19 스텝 지령속도 변화에 최대토크 제어 응답특성

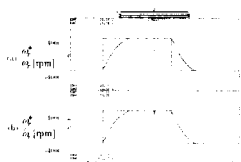


그림 20 스텝 지령속도 변화에 최대토크 제어 응답특성

다음은 ANN에 의한 IPMSM의 속도를 추정하고 수행 결과를 제시한다. 그림 17은 무부하 상태에서 스텝 지령속도를 4000[rpm]으로 운전 중, 부하토크를 4[N·m]인 가시켰을 경우 최대토크 제어의 응답특성을 나타낸다.

그림 18은 무부하 상태에서 4000[rpm]과 -4000[rpm]을 교대로 운전시켰을 경우 최대토크 제어의 응답특성을 나타낸다. 정·역회전 운전에서도 속도 추종이 양호하게 나타난다.

그림 19은 저속인 40[rpm]으로 운전하였을 때 응답특성이다. 저속 운전에서도 속도 추정은 양호하게 이루어지고 있다.

그림 20는 부하토크가 4[N·m]인 상태에서 4000[rpm]과 -4000[rpm]을 교대로 운전시켰을 경우 최대토크 제어의 응답특성을 나타낸다. 정·역회전 운전에서도 속도 추종이 양호하게 나타난다. 따라서 ANN에 의한 속도추종은 양호하게 나타나는 결과를 얻을 수 있었다.

7. 결 론

본 논문에서는 ALM-FNN 제어기를 이용하여 IPMSM 드라이브의 최대토크를 제어하기 위하여 d 와 q 축 전류의 최적 구성을 선정하는 방법을 제시하였다. 기저속도 이하인 저속에서는 MTPA 제어가 가능하였고 고속에서는 약계자 제어 및 MTPA 제어가 가능하였다. 속도 및 부하토크가 변동할 경우에도 본 논문에서 제시한 기법이 종래의 i_{d0} 방법보다 매우 양호한 응답특성을 얻을 수 있었다. 본 논문에서 제시한 제어기법이 종래의 i_{d0} 제어 보다 토크를 상승시킬 수 있었으며 CTR에서 MTPA 제어와 FWR에서 약계자 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. 제시한 ALM-FNN 제어기는 종래의 FNN 제어기 보다 성능이 우수한 결과를 얻었으며 고성능 및 강인성 제어를 확인할 수 있었다.

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

[참 고 문 헌]

- [1] 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.
- [2] S. R. Macmin and T. M. Jahns, "Control technique for interior high speed performance of interior PM synchronous motor drives," IEEE Trans. IA, vol. 27, no. 5, pp. 997 1004, 1991.
- [3] 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.
- [4] 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.