

# LM-FNN 제어기에 의한 IPMSM 드라이브의 최대토크 제어

## Maximum Torque Control of IPMSM Drive with LM-FNN Controller

남수명\*, 고재섭\*, 최정식\*, 정동화\*\*

Su-Myeong Nam\*, Jae-Sub Ko\*, Jung-Sik Choi\*, Dong-Hwa Chung\*\*

**Abstract** - Interior permanent magnet synchronous motor(IPMSM) has become a popular choice in electric vehicle applications, due to their excellent power to weight ratio. The paper is proposed maximum torque control of IPMSM drive using artificial intelligent(AI) controller. 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. This paper considers the design and implementation of novel technique of high performance speed control for IPMSM using AI controller. This paper is proposed speed control of IPMSM using learning mechanism fuzzy neural network(LM-FNN) and estimation of speed using artificial neural network(ANN) controller. The back propagation neural network technique is used to provide a real time adaptive estimation of the motor speed. The proposed control algorithm is applied to IPMSM drive system controlled LM-FNN and ANN controller, the operating characteristics controlled by maximum torque control are examined in detail. Also, this paper is proposed the experimental results to verify the effectiveness of AI controller.

**Key Words** : IPMSM Drive, Maximum Torque Control, LM-FNN, FNN, ANN, AI Controller

### 1. 서론

IPMSM의 회전자는 돌극성이고 유효 공극은 작아 전기자 반작용 효과가 현저한 장점이 있으나 자속의 직접제어가 불가능하다. 이러한 특성 때문에 일정 토크영역과 자속을 감소시켜 고속까지 운전할 수 있는 일정 출력영역에서 용이하게 동작할 수 없다. 그러나 공극자속을 d 축 전기자반작용에 의한 감작용의 영향에 의해 약화시킬 수 있는 약제자 제어가 가능하다.[1] 고속과 과도동작에서 동작조건은 dq 축 전류에 의존하며 이 전류의 조합을 적절하게 선정하여 제어하면 최대토크를 얻을 수 있다. 기저속도 이하에서는 MTPA(Maximum Torque per Ampere)에서 동작시키고 기저속도 이상이 되면 약제자 제어를 수행하며 최대 전압한계 내에서 최대 토크로 운전이 가능하다.

본 논문에서는 AI(Artificial Intelligent) 제어기에 의한 IPMSM 드라이브의 전 운전 영역에서 최대토크 제어를 제시한다. 최대 토크동작을 위하여 최적 d 축 전류를 결정하고 이 전류를 각 제어모드에서 사용한다.

속도제어기에 신경회로망과 퍼지제어를 혼합 적용한 FNN을 설계한다. 더욱 성능을 개선하기 위하여 학습 메커니즘을 이용하여 FNN 제어기의 파라미터를 갱신시키는 LM-FNN(Learning Mechanism-FNN) 제어기를 설계한다. 그리

고 ANN(Artificial Neural Network)을 이용하여 IPMSM 드라이브의 속도 추정기법을 제시한다. 본 논문에서 제시한 AI 제어기의 제어특성과 추정성능을 분석하고 실험 결과를 제시한다.

### 2. 모델링 및 동작상태

#### 2.1 모델링

동작특성을 분석하기 위한 IPMSM의 미분 방정식은 다음과 같다.[2]

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

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

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

여기서, 발생토크는 다음 식으로 표현된다.

$$\begin{aligned} T_e &= \frac{3}{2} P [\phi_a i_q + (L_d - L_q) i_d i_q] \\ &= P_m [\phi_a i_q + (L_d - L_q) i_d i_q] \end{aligned} \tag{4}$$

#### 2.2 동작상태

그림 1은 전동기가 정방향으로 운전될 경우 토크-속도 곡선을 나타낸다. 정방향 전동기의 운전영역을 일정 토크영역(CTR: Constant Torque Region)과 약제자 영역(FWR:

저자 소개

\*順天大學 電氣工學科 碩士課程

\*\*順天大學 電氣工學科 教授·工博

Field Weakening Region)으로 분류한다. CTR는 모드 I 구간으로 PWM으로 운전하고 고정자 자속과 전류도 일정하며 전압만 변화한다. FWR는 모드 구간이 두 영역으로 구분되며 모드 II는 일정 출력영역이며 전압과 전류가 일정하고 토크와 자속은 감소한다. 모드 III는 전압만 제한되는 영역이며 전압만 일정하고 고정자 전류, 토크와 자속은 감소한다.

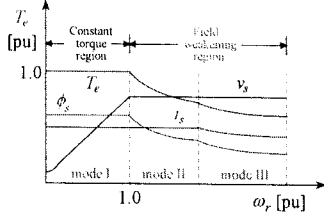


그림 1 정방향 전동기 동작에서 토크-속도 곡선

그림 2은 전류와 전압 한계조건에서 전류제적을  $i_d - i_q$  평면에 도시하면 성능을 파악할 수 있다.

- 모드 I : 일정 최대 토크에 의한 전류제한 영역 ( $\omega_1 < \omega_2$ )
- 모드 II : 전류와 전압의 제한영역 ( $\omega_1 < \omega_2 < \omega_2$ )
- 모드 III : 전압제한 영역 ( $\omega_2 < \omega_2$ )

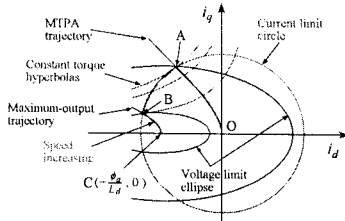


그림 2  $i_d - i_q$  평면에서 전류제적

### 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 리터턴스 토크를 이용한다. CTR 영역에서는 MTPA를 발생하기 위하여 전류벡터를 제한한다. 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.

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

CTR에서 운전하는 IPMSM 드라이브 시스템의 블록도는 그림 3과 같다.

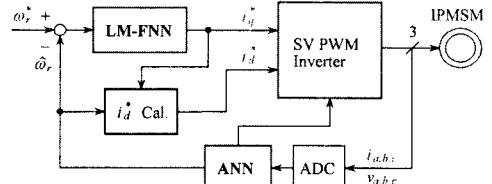


그림 3 CTR에서 드라이브 시스템의 제어 블록도

#### 3.2 FWR에서 운전

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

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

$$V_0 = \sqrt{v_{d0}^2 + v_{q0}^2} \leq V_{om} \quad (9) \quad I_0 = \sqrt{i_{d0}^2 + i_{q0}^2} \leq I_{om} \quad (10)$$

식(10)의 조건을 이용하면 식(1)과 (2)에서 다음 식을 얻는다.

$$v_{d0} = -\omega_r L_q i_q \quad (11) \quad v_{q0} = \omega_r L_d i_d + \omega_r \phi_s \quad (12)$$

$$V_{om} = V_{om} - R I_{om} \quad (13)$$

전류의  $d$ 와  $q$  축 성분은 FWR 영역에서  $V_0$ 가  $V_{om}$ 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.

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

여기서  $|i_q| \leq V_{om} / (\omega_r L_q)$ , i.e.  $|v_{q0}| \leq V_{om}$  이다.

##### 3.2.2 전압제한 영역 ( $\omega_2 < \omega_r$ )

이 영역은 그림 2의 모드 III에 해당하며 두 조건을 고려해야 한다. 그림 4는 전동기의 동작모드를 나타낸다.

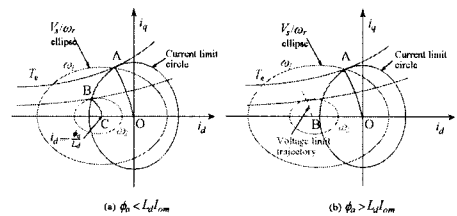


그림 4 전동기의 동작 모드

각 동작점에서 일정 최대토크는  $V_{om} / \omega_r$  타원에 접선방향으로 제적이 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.

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

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

#### 4. AI 제어기

IPMSM 드라이브 시스템을 위한 AI 제어기인 LM-FNN 제어기 및 ANN은 그림 5와 같다. FNN 제어기는 드라이브 시스템의 동작을 관측하고 요구되는 지령치로 실제 성능을 비교한다. 학습 메카니즘은 요구되는 시스템 동작으로 거의 일치시키기 위하여 FNN 제어기를 수정한다. FNN의 입력은 속도오차  $e$  및 속도오차의 변화분  $ce$  이다. FNN의 출력  $\Delta i_q^*$ 는 중심 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.

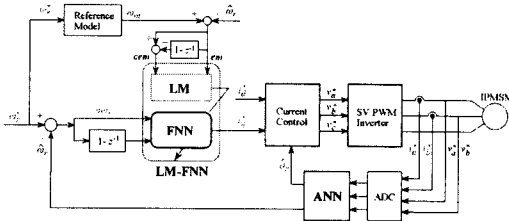


그림 5 AI 제어기

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

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

ANN은 인간 두뇌의 간단한 모델에 의해 사고하는 구조로 이루어진 컴퓨팅 시스템이다. ANN을 이용한 시스템의 추정에서 구한 IPMSM의 최종 추정속도는 다음 식과 같다.[3]

$$\begin{aligned} \hat{\omega}_r(k+1) &= \hat{\omega}_r(k) + \Delta \hat{\omega}_r(k) \\ &= \hat{\omega}_r(k) - \frac{\Delta W_2(k)}{T} \\ &= \hat{\omega}_r(k) - \frac{T}{T} \{ [\hat{\phi}_2(k) - \hat{\phi}_2(k)] [\hat{\phi}_2(k-1)] - [\hat{\phi}_2(k) - \hat{\phi}_2(k)] [\hat{\phi}_2(k-1)] \} \\ &\quad - \frac{\alpha}{T} \Delta W_2(k-1) \end{aligned} \quad (18)$$

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 6은 본 논문에서 최종적으로 제시한 AI 제어기에 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.

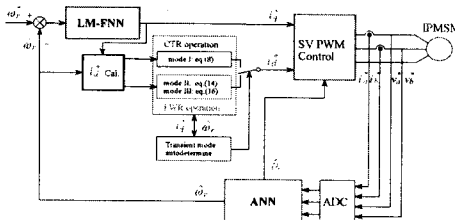


그림 6 AI 제어기에 의한 최대토크 제어의 전체 블록도

#### 5. 시스템의 성능결과

그림 7과 그림 8은 무부하 상태에서 스텝 지령속도를 4000[rpm]으로 운전 중, 부하토크를 4[N·m]인 가 시켰을 경우의  $I_d=0$ 와 최대토크 제어의 응답특성을 나타낸다. 그림 7(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 빠르며 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.

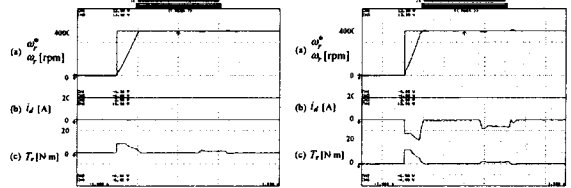


그림 7 스텝 지령속도에 대한  $I_d=0$  제어의 응답특성

그림 8 스텝 지령속도에 대한 최대토크 제어의 응답특성

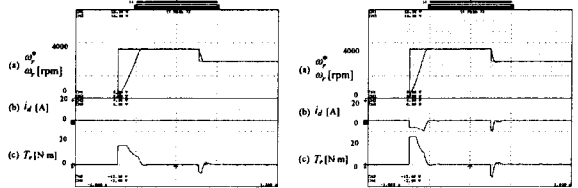


그림 9 지령속도 변화에 대한  $I_d=0$  제어의 응답특성

그림 10 지령속도 변화에 대한 최대토크 제어의 응답특성

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

그림 13과 그림 14는 무부하 상태에서 4000[rpm]으로 운전 중, 부하토크를 4[N·m]인가하여 3000[rpm]으로 운전속도를 변화시켰을 경우 FNN과 LM-FNN의 응답특성을 나타낸다. 부하를 인가한 경우에도 LM-FNN제어기의 응답성능은 FNN제어기 보다 상승 시간이 빠르며 속도 추종이 양호하게 나타난다.

그림 15과 그림 16는 다양한 속도변화에 대한 응답변화로 무부하 상태에서 운전속도를 0[rpm]→2000[rpm]→4000[rpm]→-4000[rpm]→0[rpm]로 운전속도를 변화하였을 때 FNN과 LM-FNN의 응답특성을 나타낸다. 다양한 속도변화에서도

LM-FNN 제어기는 FNN 제어기에 비해 오버슈트가 적고 상승 시간이 짧으며 정상상태에 빠르게 도달한다.

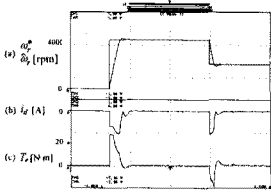


그림 11 지령속도 변화에 대한 FNN의 응답특성

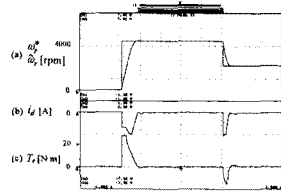


그림 12 지령속도 변화에 대한 LM-FNN의 응답특성

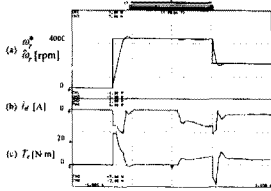


그림 13 지령속도 변화와 부하 인가에 대한 FNN의 응답특성

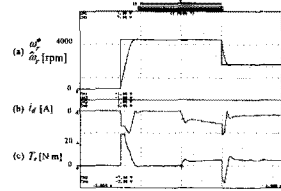


그림 14 지령속도 변화와 부하 인가에 대한 LM-FNN의 응답특성

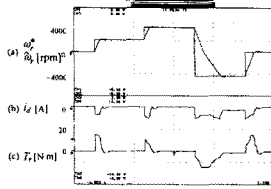


그림 15 스텝 지령속도에 변화에 대한 FNN의 응답특성

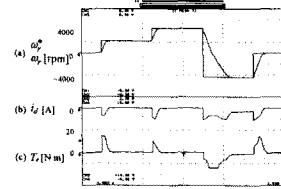


그림 16 스텝 지령속도에 변화에 대한 LM-FNN의 응답특성

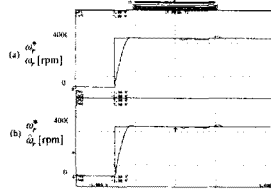


그림 17 스텝 지령속도에 변화에 대한 최대토크 제어의 응답특성

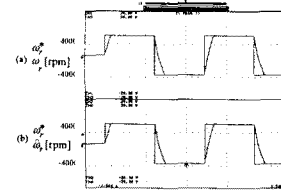


그림 18 스텝 지령속도에 변화에 대한 최대토크 제어의 응답특성

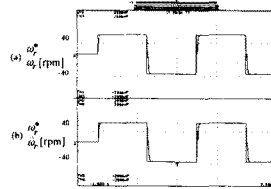


그림 19 스텝 지령속도 변화에 최대토크 제어 응답특성

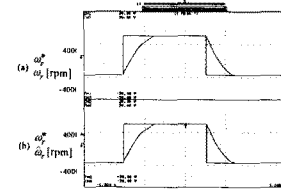


그림 20 스텝 지령속도 변화에 최대토크 제어 응답특성

다음은 ANN에 의한 IPMSM의 속도를 추정하고 수행 결과를 제시한다.

그림 17은 무부하 상태에서 스텝 지령속도를 4000[rpm]으로 운전 중, 부하토크를 4[N·m]인가 시켰을 경우 최대토크 제어의 응답특성을 나타낸다. 추정속도는 실제속도에 양호하게 추종하고 있다.

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 19는 저속인 40[rpm]으로 운전하였을 때 응답특성이다. 저속 운전에서도 속도 추종은 양호하게 이루어지고 있다.

그림 20은 부하토크가 4[N·m]인가된 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.

## 6. 결론

본 논문에서는 AI 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. 따라서 저속과 고속의 전 속도영역에서 본 논문에서 제시한 방법이 우수한 응답특성의 결과를 얻을 수 있었다. 본 논문에서 제시한 제어 기법이 종래의  $i_{d0}$  제어 보다 토크를 상승시킬 수 있었으며 CTR에서 MTPA 제어와 FWR에서 약계자 제어 및 MTPA가 양호하게 수행하여 최대토크를 얻을 수 있었다.

또한, LM-FNN과 ANN을 이용하여 IPMSM의 고성능 속도 제어 및 추정을 제시하였다. LM-FNN 제어기는 종래의 FNN 제어기 보다 성능이 우수한 결과를 얻었으며 고성능 및 강인성 제어를 확인할 수 있었다. ANN을 이용하여 다양한 지령속도의 변화에도 추정속도는 실제속도에 양호하게 추종하였다. 따라서 본 논문에서 제시한 제어 기법의 타당성을 입증할 수 있었다.

## 참고 문헌

- [1] 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.
- [2] D. H. Chung, "Power electronics and motor control," Interscience Press, 2005.
- [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.