

# IPMSM 드라이브의 최대토크를 위한 적응 FNN 제어기

Adaptive FNN Controller for Maximum Torque of IPMSM Drive

김도연\* · 고재섭 · 최정식 · 정병진 · 박기태 · 최정훈 · 정동화

(Do-Yeon Kim · Jae-Sub Ko · Jung-Sik Choi · Byung-Jin Jung · Ki-Tae Park · Jung-Hoon 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. This paper proposes maximum torque control of IPMSM drive using adaptive fuzzy neural network controller 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 Adaptive-FNN controller and ANN controller. The hybrid combination of neural network and fuzzy control will produce a powerful representation flexibility and numerical processing capability. Also, this paper proposes speed control of IPMSM using Adaptive-FNN and estimation of speed using 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 Adaptive-FNN 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 Adaptive-FNN and ANN controller.

## 1. 서론

IPMSM의 정상상태에서 최대 토크는 정격 전기자 전류에 의존한다. 최대 토크에 도달할 수 있는 최대 속도는 이용 가능한 인버터의 출력전압에 제한을 받는다. 전류와 전압 정격의 한계를 고려하여 모든 속도범위에서 최대 출력을 발생하기 위하여 고정자 전류의 d축 성분을 벡터제어에 의해 온라인으로 제어한다.[1-2]

산업 프로세서의 적용에는 부하 외란, 파라미터 변화 및 어떤 모델의 불확실성 등에 대하여 고성능과 강인성을 발휘할 수 있는 기법이 필요하다. 이러한 문제점을 해결하기 다양한 연구가 시도되었다.[3-5] 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 정보

를 얻기 위하여 엔코더와 리졸버와 같은 센서를 사용한다. 그러나 이러한 센서는 실제의 적용분야에서 많은 문제점이 도출되며 시스템의 적용분야가 제한된다. 이러한 문제점을 해결하기 위하여 센서리스 제어에 관한 연구가 활발히 진행되고 있다.[6-8]

본 논문에서는 적응-FNN(Adaptive Fuzzy Neural Network) 및 ANN(Artificial Neural Network)에 의한 IPMSM 드라이브의 전 운전 영역에서 최대토크 제어를 제시한다. 또한 IPMSM 드라이브의 고성능 속도제어를 위하여 적응 FNN 제어기를 설계한다. 그리고 ANN을 이용하여 IPMSM 드라이브의 속도 추정기법을 제시한다. 본 논문에서 제시한 적응 FNN과 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.[9]

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

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

$$p \omega_r = (T_e - T_L - B \omega_r) / J \quad (3)$$

여기서, 발생토크는 다음 식으로 표현된다.

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

## 2.2 동작상태

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

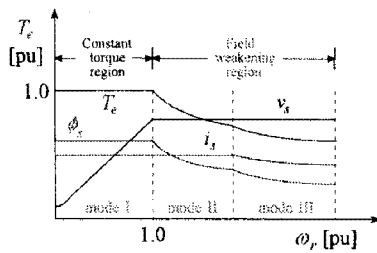


그림 1 정방향 전동기 동작에서 토크-속도 곡선  
Fig. 1 Torque-speed curve in forward motoring

정방향 전동기의 운전영역을 일정 토크영역(CTR: Constant Torque Region)과 약제자 영역(FWR: 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 2는 전류와 전압 한계조건에서 전류궤적을  $i_d - i_q$  평면에 나타내고 있다.

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

최대 토크를 위한 최적 전류각과 전류제한에서 동작하는 최대토크를 발생하는 저속영역이다. 이는  $i_d - i_q$  평면의 일정 토크궤적에서는 A점과 일치하며 토크궤적은 일정 전류원과 접하게 된다. 전압제한은 모드 I에서 최고의 속도로 정의한다. 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( $\omega_2 < \omega_r$ )

속도를 더욱 증가시키면 전류가 감소하게 되고 이 경우에 전류제한에 있는 전류를 발생시키기 위하여 일정 전압이 불충분하다. 전동기는 일정 토크궤적이 일정 전압타원에 접해 있는 최적조건에서 동작한다. 즉, 토크는 B점 이상의 속도에 대한 각 값에서 최대화가 된다.

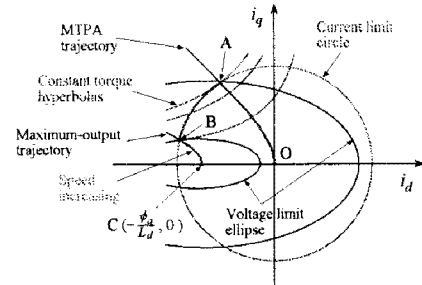


그림 2  $i_d - i_q$  평면에서 전류궤적  
Fig. 2 Current locus in  $i_d - i_q$  plane

## 3. 최대 토크제어

### 3.1 일정 토크영역(CTR)에서 운전

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

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

지령속도와 실제속도를 비교하여 그 오차속도를 적용 FNN 제어를 이용하여  $i_q^*$ 를 구한다. 식(8)에서  $i_q$ 는  $i_q^*$ ,  $i_d$ 는  $i_d^*$ 로 대체하면  $i_d^*$ 에 대한 결과 식을 계산할 수 있다.  $i_q^*$ 와  $i_d^*$ 는 SV(Space Vector) PWM을 발생시키게 하며 이 PWM으로 인버터를 구동하여 IPMSM을 제어하게 된다.

### 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 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.

기저속도를 초과하여 FWR 영역으로 진입하면  $i_d^*$ 는 식(14)을 사용하여 제어한다.

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

이 영역은 그림 2의 모드 III에 해당하며 두 조건을 고려해야 한다. 그림 3은 전동기의 동작모드를 나타내며 그림 3(a)는  $\phi_a < L_d I_{0m}$ 의 조건이 만족될 경우, 속도가 증가하여  $\omega_2$  이상이 되면 점 B에서 점 C로 동작을 한다. 점 B에서 속도  $\omega_2$ 는 모드 III의 최소 속도가 되며 이 점에서 모드 III의 영역으로 진입하여 동작을 하게 된다. 그림 3(b)는  $\phi_a > L_d I_{0m}$ 의 조건에 해당하는 경우를 나타내며 전압제한 궤적이 일정 전류원의 외부에 존재한다. 이 영역의 동작은 수행할 수 없으며 모드 III의 영역은 존재하지 않는다.

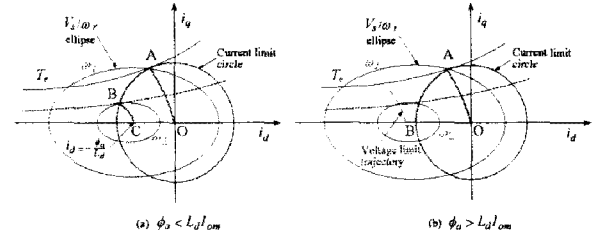


그림 3 전동기의 동작 모드  
Fig. 3 Operating mode of motor

그림 3(a)의 조건이 만족할 경우, 정격전압은 일정 정격전류를 충분히 발생시킬 수 없으며 속도가 더욱 증가하면 전기자전류를 감소시킨다. 각 동작점에서 일정 최대토크는  $V_{0m} / \omega_r$ , 타원에 접선방향으로 궤적이 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 III는 그림 4의 시스템 블록도에  $i_d^*$ 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. 동작모드의 전이는 전동기로부터 전압과 전류의 피드백이 필요하지 않고 자동적으로 결정된다.

### 4. 적응 FNN 제어기의 설계

IPMSM 드라이브는 과도 특성에서 다양한 속도 추정 능력, 부하 및 관성 등 파라미터의 변동에도 고성능 및 강인성이 요구된다. 적응 FNN 제어기는 FNN 제어기에 기준 모델을 설계하여 퍼지추론으로 구현할 수 있는 적응 메카니즘으로 구성한다.

그림 4는 FNN 제어기를 설계하고, 적응 퍼지제어기인 AFC(Adaptive Fuzzy Controller)를 병렬로 연결한다. FNN에서 나타나는 오차를 보상하기 위하여 AFC를 사용하며 AFC는 기준 모델을 고려한 적응 메카니즘을 나타낸다.



서  $i_d=0$  제어는  $i_d$ 가 연속하여 영으로 유지되고 있으나 최대토크 제어에서는 음의 값이 나타나고 있다. 그림 (d)에서 최대토크 제어가  $i_d=0$  제어 보다 토크가 매우 크게 나타나고 있다.

그림 10은 그림 9에서 부하가 인가된 부분을 확대하여 비교한 응답특성이다. 최대토크 제어가 오버슈트도 작고 안정화 시간도 빠르게 나타나며  $i_d$ 는 제어가 되고 있다.

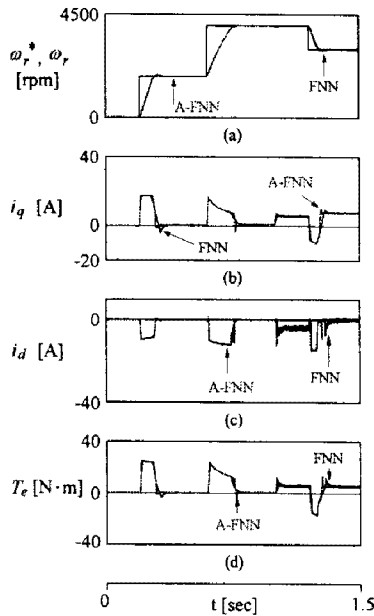


그림 6 속도와 부하토크 변화에 대한 응답특성  
Fig. 6 Response characteristics with speed and load torque

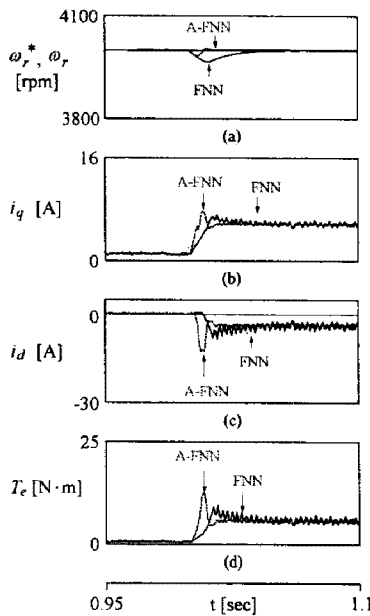


그림 7 부하토크 대한 응답특성  
Fig. 7 Response characteristics with load torque

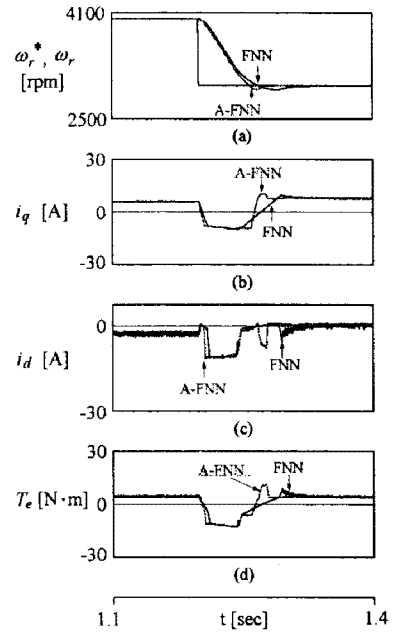


그림 8 지령속도의 변화에 대한 응답특성  
Fig. 8 Response characteristics with change of command speed

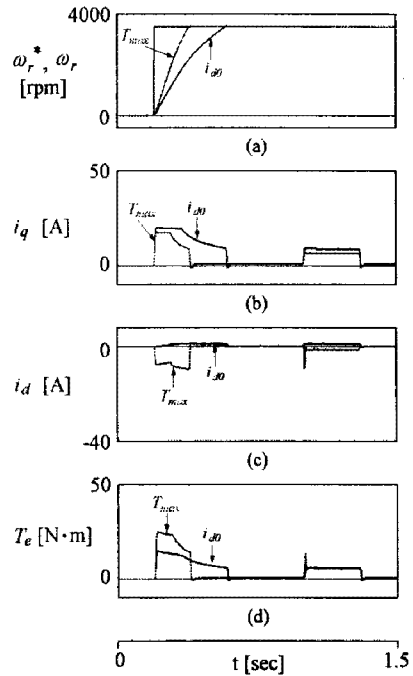


그림 9 속도와 부하 변화에 대한 응답 비교  
Fig. 9 Comparison of response with speed change and load torque

## 5. 결 론

본 논문에서는 적응-FNN 제어기 및 ANN을 이용하여 IPMSM 드라이브의 최대토크를 제어하기 위하여  $d$ 와  $q$  축 전류의 최적 구성을 선정하는 방법을 제시하였다. 기저속도 이하인 저속에서는 MTPA 제어가 가능하였고 고속에서는 약계자제어 및 MTPA 제어가 가능하였다. 속도 및 부하토크가 변동할 경우에도 본 논문에서 제시한 기법이 종래의  $i_{d0}$  방법보다 매우 양호한 응답특성을 얻을 수 있었다.

제시한 적응-FNN 제어기는 종래의 PI 및 FNN 제어기 보다 성능이 우수한 결과를 얻었으며 고성능 및 강인성 제어를 확인할 수 있었다. ANN을 이용하여 다양한 지령속도의 변화에도 추정속도는 실제속도에 양호하게 추정하였다. 지령속도를 정·역회전 운전 및 4상한 운전시켰을 경우에도 추정속도는 실제속도에 양호하게 추정하였다. 그리고 부하토크를 인가할 경우에도 추정속도는 실제속도에 양호한 추정성능을 확인할 수 있었다.

본 논문에서는 제시한 적응-FNN과 ANN을 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.

## 참고문헌

- [1] B. K. Bose, "Power Electronics and AC Drives," New Jersey, Prentice-Hall, 1986.
- [2] 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. IA, vol. 35, no. 4, pp. 547-559, 1988.
- [3] 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.
- [4] S. M. Nam, J. C. Lee and D. H. Chung, "ANN sensorless control of induction motor with FLC-FNN controller," The Trans. of KPE, vol. 11, no. 3, pp. 224-232, 2006.
- [5] 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.
- [6] C. Schauder, "Adaptive speed identification for vector control of induction motors," IEEE Trans. on IA, pp. 1054-1061, 1992.
- [7] 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.
- [8] 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.
- [9] D. H. Chung, "Power electronics and motor control," Interscience Press, 2005.
- [10] D. H. Chung, et al., "Speed sensorless control of IPMSM drive with ANN," KIEE Trans, vol. 52P, no. 4, pp. 154-160, 2003.

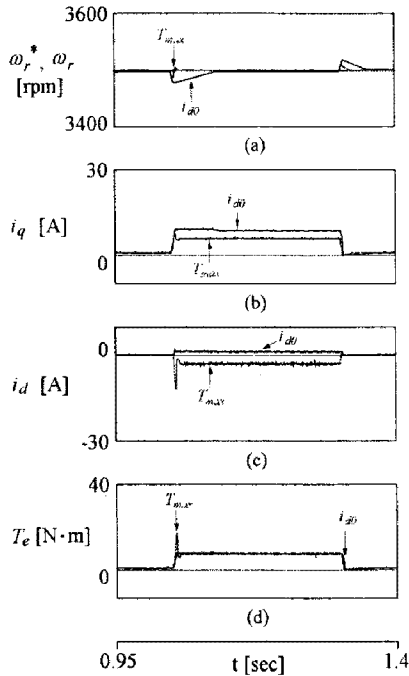


그림 10 부하변화에 대한 응답특성  
Fig. 10 Response characteristics with load torque change

그림 11은 관성을 정격의 3배로 증가시킨 상태에서 4상한 운전 중, 0.7[sec]에서 부하토크를 3[N·m] 인가한 경우의 응답특성을 나타낸다. 그림 11(a)는 지령속도와 실제속도, (b)는 추정속도를 나타내며 그림(c)는  $d$ 축 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.

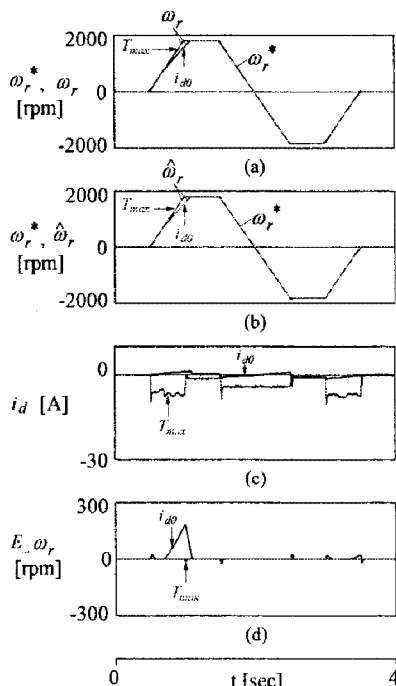


그림 11 4상한 운전에 대한 응답특성  
Fig. 11 Response characteristics with quadrant operation