

FNN-PI를 이용한 IPMSM의 효율최적화 제어

(Efficiency Optimization Control of IPMSM using FNN-PI)

정병진* · 고재섭 · 최정식 · 정철호 · 김도연 · 전영선 · 정동화

(Byung-Jin Jung* · Jae-Sub Ko · Jung-Sik Choi · Chul-Ho Jung · Do-Yeon Kim · Young-Sun Jun · 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. In order to maximize the efficiency in such applications, this paper proposes the FNN(Fuzzy Neural-Network)-PI controller. The controllable electrical loss which consists of the copper loss and the iron loss can be minimized by the error back propagation algorithm(EBPA). This paper considers the parameter variation about the motor operation. The operating characteristics controlled by efficiency optimization control are examined in detail.

1. 서론

IPMSM(Interior PMSM)은 효율이 좋고 고온에서 손실이 작기 때문에 전자동차 및 에어컨 컴퓨터의 드라이브 등에 적용되고 있다.[1]-[2] 이와 같은 드라이브에서 연속적인 장시간 운전이 요구되며 전동기의 효율이 가장 중요한 성능요인 중의 하나이다. 에너지 절약의 관점에서 IPMSM을 위한 고효율 드라이브는 반드시 필요하다.

효율을 개선시킬 수 있는 기법은 두 형태로 분류할 수 있다. 첫째는 최소 동작점의 적응 추적이며[3] 둘째는 최적 d축 전류를 이용한 고효율 드라이브 제어기의 개발이다.[4]-[6] 첫째 방법은 적용이 늦고 둘째 방법은 실시간 계산의 어려움 때문에 파라미터 변동에 민감한 문제점을 가지고 있다.

본 논문은 최대 효율에서 IPMSM 드라이브를 구동시키기 위해 손실을 최소화하는 최적 d축 전류를 계산하여 효율 최적화 제어기를 개발한다. 또한 Fuzzy 제어와 신경회로망을 혼합한 FNN-PI 제어기를 이용하여 IPMSM의 드라이브 고성능 제어를 제시한다. 다양한 동작상태에서 FNN-PI 제어기의 양호한 성능을 확인한다.

2. FNN-PI 제어기

2.1 Fuzzy 제어기

신경회로망에 입력되는 K_p 와 K_i 를 위한 Fuzzy 제어기의 설계는 그림 1과 같다.

Fuzzy 제어기에서 입력은 속도 오차 e 와 속도 오차의 변화 ce 이고 출력은 두 개의 이득 HK_p 와 HK_i 이다. HK_p 와 HK_i 를 경신하기 위한 퍼지 룰은 표 1과 표 2에

나타낸다. 퍼지집합은 같은 폭으로 중복된 삼각형 함수를 사용한다.

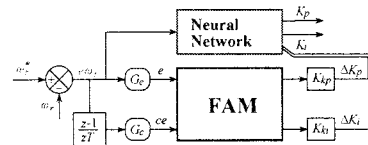


그림 1 Fuzzy 제어기의 구조
Fig. 1 The structure of Fuzzy controller

표 1 이득 HK_p 를 경신하기 위한 룰 베이스 Table 1 Rule base to update gain HK_p							표 2 이득 HK_i 를 경신하기 위한 룰 베이스 Table 2 Rule base to update gain HK_i								
$\frac{e, ce}{\omega}$	NL	NM	NS	ZE	PS	PM	PL	$\frac{e, ce}{\omega}$	NL	NM	NS	ZE	PS	PM	PL
NL	ZE	NS	NM	NL	NM	NS	ZE	NL	NL	NL	NL	NM	NS	ZE	PS
NM	PS	ZE	NS	NM	NS	ZE	PS	NM	NL	NL	NM	NS	ZE	PS	PM
NS	PM	PS	ZE	NS	ZE	PS	PM	NS	NL	NL	NM	NS	ZE	PS	PM
ZE	PL	PM	PS	ZE	PS	PM	PL	ZE	NL	NM	NS	ZE	PS	PM	PL
PS	PM	PS	ZE	NS	ZE	PS	PM	PS	NM	NS	ZE	PS	PM	PL	PL
PM	PS	ZE	NS	NM	NS	ZE	PS	PM	NS	ZE	PS	PM	PL	PL	PL
PL	ZE	NS	NM	NL	NM	NS	ZE	PL	ZE	PS	PM	PL	PL	PL	PL

$$HK_p = K_p + K_{kp} f_1(e_n, \Delta e_n) \quad (1)$$

$$HK_i = K_i + K_{ki} f_2(e_n, \Delta e_n) \quad (1)$$

드라이브의 안정화를 위하여 이득 HK_p 와 HK_i 는 정상상태에 도달하면 제한하고 지령속도가 변화할 경우에는 초기화한다.

2.2 신경회로망에 의한 FNN-PI 제어기

그림 2는 신경회로망에 의한 PI 제어기의 블록도를 나타낸다. 그림 2에서 NN(Neural Network)은 신경회로망의 파라미터 동조기이며 k_p 와 k_i 는 PI의 이득이다.

각 학습 패턴은 $e\omega_r = (\omega_r^* - \omega_r)$, i_q^* , T_L , k_p 및 k_i 의 5개 파라미터가 포함되도록 설계한다. 제시한 시스템에서는 입력은 $e\omega_r$, i_q^* 및 T_L 이며 출력은 k_p 와 k_i 이다. 성능 지수 F 는 다음 식과 같이 정의한다.

$$F = F(\text{overshoot, rise_time, steady_state_error}) \\ = k_1 \cdot \text{overshoot} + k_2 \cdot \text{rise_time} + k_3 \cdot \text{steady_state_error} \quad (5)$$

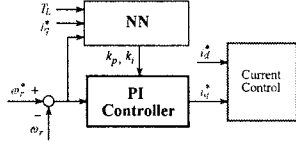


그림 2 신경회로망에 의한 PI 제어기
Fig. 2 PI controller with neural network

각 입력벡터 $e\omega_r$, i_q^* 및 T_L 에 대하여 최적인 k_p 및 k_i 를 구하는 효율적인 방법을 제시한다. k_p 및 k_i 를 결정하는 과정은 다음과 같다.

단계 1) $k_p (k_{pmin} < k_p < k_{pmax})$ 및 $k_i (k_{imin} < k_i < k_{imax})$ 를 각각 7개의 구간으로 나눈다.

단계 2) 각 k_p 의 결정을 위하여 다음 단계가 필요하다.

- $F(t+1) < F(t)$ 의 조건 동안 한 구간에서 k_i 를 점차적으로 증가시킨다.
- $F(t+1) > F(t)$ 의 조건이 검출되면 $F(t+1) > F(t)$ 의 조건까지 1/2 구간까지 점차적으로 k_i 를 점차적으로 감소시킨다.
- $F(t+1) > F(t)$ 의 조건이 다시 검출될 때까지 1/4 구간까지 k_i 를 증가시킨다.
- 선택된 k_i 에 대한 k_{iopt} 는 $k_{iopt} = (k_i(t) + k_i(t+1))/2$ 이다. 선택된 k_p 와 k_{iopt} 에 대한 F_{opt} 는 $F_{opt} = (F(t+1) + F(t))/2$ 이다.

단계 3) 단계 2)에서 구한 모든 k_p 및 k_i 중에서 최소 F_{opt} 을 가지는 최적치를 찾는다.

그림 3은 Fuzzy 제어와 신경회로망을 혼합한 FNN-PI 제어기의 전체 구성도를 나타낸다. Fuzzy 제어를 통해 동조된 PI 이득을 신경회로망의 입력으로 사용되며 신경회로망은 학습을 통해 최적의 PI 이득을 출력한다.

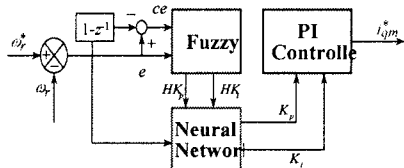


그림 3 FNN-PI 제어기의 전체 구성도
Fig. 3 Block diagram of FNN-PI ontroller

3. 효율 최적화 제어

3.1 손실과 효율 계산

정상상태에서 전류 식은 다음과 같다.

$$i_d = i_{dm} + i_{dc} = i_{dm} - \frac{\omega_r L_q i_{qm}}{R_c} \quad (4)$$

$$i_q = i_{qm} + i_{qc} = i_{qm} + \frac{\omega_r (\phi_s + L_d i_{dm})}{R_c} \quad (5)$$

정상상태에서 동손 및 철손은 다음과 같다.

$$P_{cu} = R_s (i_d^2 + i_q^2) \quad (6)$$

$$P_{fe} = R_c (i_d^2 + i_q^2) \quad (7)$$

정상상태에서 동손 및 철손은 다음과 같다.

$$P_{cu} = R_s (i_d^2 + i_q^2) \quad (8)$$

$$P_{fe} = R_c (i_d^2 + i_q^2) \quad (9)$$

전체 손실을 구하면 다음과 같다.

$$P_{total} = P_{cu} + P_{fe} = Ai_{dm}^2 + Bi_{qm}^2 + Ci_{dm}i_{qm} + Di_{dm} + Ei_{qm} + F \quad (10)$$

여기서, 지정한 계수는 다음과 같다.

$$A = R_s + \frac{(\omega_r L_d)^2 (R_c + R_s)}{R_c^2}, \quad B = R_s + \frac{(\omega_r L_q)^2 (R_c + R_s)}{R_c^2}$$

$$C = \frac{2 \cdot \omega_r \omega_r L_d (1 - \rho)}{R_c}, \quad D = \frac{2 \cdot \omega_r^2 \phi_s L_d (R_s + R_c)}{R_c^2}$$

$$E = \frac{2 \cdot \omega_r \omega_r \phi_s}{R_c}, \quad F = \frac{(\omega_r \phi_s)^2 (R_c + R_s)}{R_c^2}$$

토크로 표현된 i_{qm} 을 구하면 다음과 같다.

$$i_{qm} = \frac{T_e}{P_n \{ \phi_s + X i_{dm} \}} = \frac{T}{K} \quad (11)$$

여기서, 지정한 계수는 다음과 같다.

$$T = \frac{T_e}{P_n}, \quad X = L_d (1 - \rho), \quad K = \phi_s + X i_{dm} \quad (12)$$

식(11)을 식(10)에 대입하여 정리하면 다음과 같다.

$$P_{total} = Ai_{dm}^2 + B \left(\frac{T}{K} \right)^2 + Ci_{dm} \frac{T}{K} + Di_{dm} + E \frac{T}{K} + F \\ = A \left(\frac{K - \phi_s}{X} \right)^2 + B \left(\frac{T}{K} \right)^2 + \frac{CT(K - \phi_s)}{KX} + \frac{D(K - \phi_s)}{X} + \frac{ET}{K} + F \quad (13)$$

3.2 효율 최적화의 조건

손실을 최소화하는 조건은 i_{dm} 로 손실 P_{total} 을 한번 미분하여 영으로 두면 얻을 수 있다.

$$\frac{dP_{total}}{di_{dm}} = 0 \quad (14)$$

전체손실인 식(14)을 편미분하여 얻은 결과는 다음과 같다.

$$\frac{\partial P_{total}}{\partial i_{dm}} = \frac{\partial P_{total}}{\partial K} \frac{\partial K}{\partial i_{dm}} \\ = \frac{1}{KX^2} \{ 2AK^4 + (XD - 2A\phi_s)K^3 - 2BX^2T^2 \} = 0 \quad (15)$$

식(15)에서 K 를 구한 다음, i_{dm} 을 구하면 다음과 같다.

$$i_{dm} = \frac{-(2A\phi_a + XD) + \sqrt{(XD - 2A\phi_a)^2 + 16ABX^2 i_{gm}^2}}{4AX} \quad (16)$$

그림 4는 본 논문에서 제시한 효율 최적화 제어에 의하여 속도제어를 수행하는 블록이다.

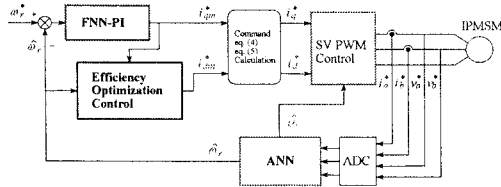


그림 4 효율 최적화 제어에 의한 속도제어
Fig. 4 Speed control with efficiency optimization control

4. 시스템의 성능결과

그림 5는 0.2[sec]에서 지령속도를 1800[rpm]으로 운전시키고 0.6~0.8[sec]에서 부하토크를 3[N·m]으로 인가했을 경우에 나타나는 응답특성이다. (a)는 지령속도와 실제속도이며, (b)와 (c)는 본 논문에서 제시한 FNN-PI 제어기에서 구한 이득 k_p , k_i 을 나타내고 그림 (d)는 발생토크를 나타낸다. FNN-PI 제어기가 PI 제어기보다 오버슈트가 작고 상승시간도 짧으며 빠르게 안정화되고 정상상태에 빠르게 추종한다.

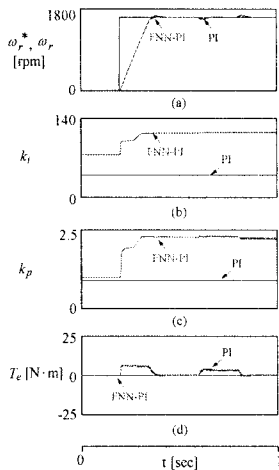


그림 5 속도와 부하변화에 대한 응답특성
Fig. 5 Response characteristic about speed and load variation

그림 6은 관성을 2배로 증가시키고 4상한 운전 하었을 경우에 나타나는 응답특성이다. (a)는 FNN-PI 제어기, (b)는 PI 제어기의 지령속도와 실제속도를 나타내며, (c)와 (d)는 FNN-PI 제어기와 PI 제어기의 속도 오차를 나타낸다. (c)와 (d)에서 나타난 것과 같이 FNN-PI 제어기가 PI 제어기보다 속도오차가 매우 작게 나타나고 있음을 알 수 있다.

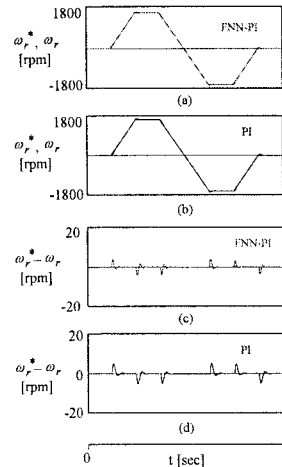


그림 6 속도와 부하의 변화에 대한 응답특성 비교
[$J = 2J_n$]

Fig. 6 The comparison of response characteristics with speed and load torque

그림 7은 회전자 저항을 2배로 증가시키고 4상한 운전을 하였을 경우에 나타나는 응답특성이다. (a)는 FNN-PI 제어기, (b)는 PI 제어기의 지령속도와 실제속도를 나타내며, (c)와 (d)는 FNN-PI 제어기와 PI 제어기의 속도 오차를 나타낸다. (c)와 (d)에서 나타난 것과 같이 FNN-PI 제어기가 PI 제어기보다 속도오차가 매우 작게 나타나고 있음을 알 수 있다.

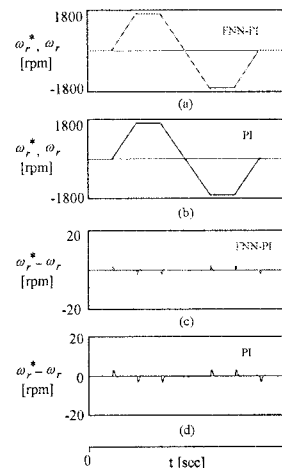


그림 7 속도와 부하의 변화에 대한 응답특성 비교
[$R = 2R_n$]

Fig. 7 The comparison of response characteristics with speed and load torque

그림 8은 FNN-PI 제어기로 속도를 제어하며 부하토크를 1[N·m]인가한 상태에서 4상한 운전에 대한 응답특성을 나타낸다. 그림(d)는 총 손실을 나타낸다. i_{d0} 제어 운전하였을 경우 총 손실이 크게 나타난다.

그림 9는 그림 8과 같은 조건에서 효율 최적화를 수

행하였다. 그림 9(c)에서 d 축 고정자 전류가 효율 최적화 제어에 의해 양호하게 제어가 되고 있다. 그림 7(d)의 총 손실은 i_{d0} 제어로 운전 한 그림 8(d)와 비교하면 손실이 크게 저감되었다.

그림 10은 그림 8과 9의 운전에 따른 손실을 비교하여 나타낸다. 그림 6.7(a)는 동손, 그림 10(b)는 철손, 그림 10(c)는 총 손실을 나타낸다.

그림 10에서 A는 i_{d0} 제어로 운전 한 경우이며, B는 효율 최적화 제어로 운전한 경우이다. 동손과 철손은 효율 최적화 제어를 하였을 경우 손실이 적게 나타나고 있다.

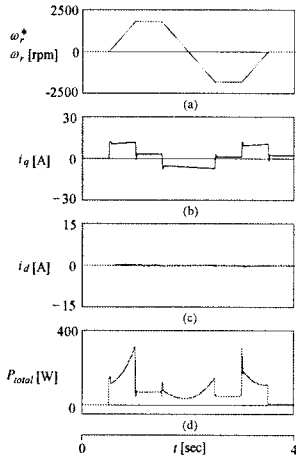


그림 8 4상한 운전의 대한 응답특성 (i_{d0} 제어)
Fig. 8 Response characteristics with quadrant drive (i_{d0} control)

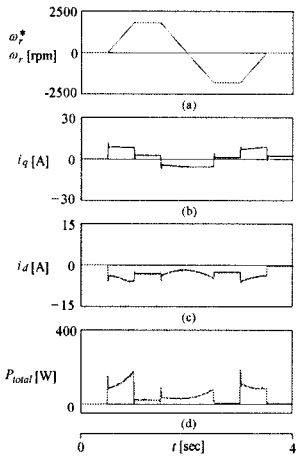


그림 9 4상한 운전의 대한 응답특성(효율최적화 제어)
Fig. 9 Response characteristics with quadrant drive (efficiency optimization control)

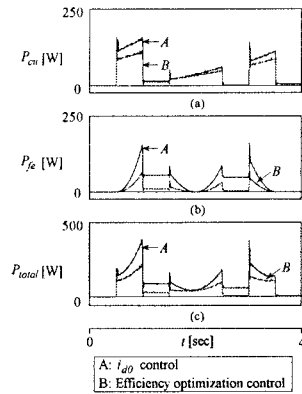


그림 10 i_{d0} 제어와 효율 최적 제어의 전체 손실 비교
Fig.10 Total loss comparison of i_{d0} control and efficiency optimization control

5. 결 론

본 논문에서는 IPMSM 드라이브의 효율 최적화 제어를 위하여 퍼지제어와 신경회로망을 이용한 FNN-PI 제어를 제시하였다. 효율 최적화 제어에서 손실은 d 축 전류의 최적화 제어에 의해 최소화하였다. 속도, 부하토크 변화 및 저항 및 관성과 같은 파라미터 변동에서 FNN-PI 제어기는 종래의 PI 제어기 보다 오버슈트, 상승시간 및 안정화 시간이 양호하게 나타났다. 따라서 본 논문의 타당성을 입증할 수 있었다.

참 고 문 헌

- [1] A. B. Kulkarni and M. Ehsani, "A novel position elimination technique for the interior permanent magnet synchronous motor drive," IEEE Trans. Ind. Appl., vol. 28, pp. 144-150, 1992.
- [2] R. Wu and G. R. Slemon, "A permanent magnet motor drive without shaft sensor," IEEE Trans. IA, vol. 27, pp. 1005-1011, 1991.
- [3] C. Mademlis, J. Xypteras and N. Margaris, "Loss Minimization in surface permanent magnet synchronous motor drive," IEEE Trans. on IE, vol. 47, no. 1, pp. 115-122, 2000.
- [4] S. Morimoto, Y. Tong, Y. Taketa and T. Hirasu, "Loss minimization control of permanent magnet synchronous motor drives," IEEE Trans. on IE, vol. 41, no. 5, pp. 511-517, 1994.
- [5] F. F. Bernal, A. G. Cerrade and R. Faure, "Model-based loss minimization for DC and AC vector controlled motors including core saturation," IEEE Trans. on IA, vol. 36, no. 3, pp. 755-763, 2000.
- [6] N. Urasaki, T. Senjyu and K. Uezato, "High efficiency drive for PMSM based on accurate mathematical model," in Proc. IFEC-Tokyo 2000, vol. 3, pp. 1207-1212, 1000.