

IPMSM 드라이브의 효율 최적화를 위한 Adaptive-FNIS 제어

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

Adaptive-FNIS Control for Efficiency Optimization of IPMSM Drive

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

**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 Adaptive-FNIS(Fuzzy Neural Network Inference System). The controllable electrical loss which consists of the copper loss and the iron loss can be minimized by the optimal d-axis current  $i_d$ . This paper considers the parameter variation about the motor operation. The operating characteristics controlled by efficiency optimization control are examined in detail.

1. 서 론

IPMSM(Interior PMSM)은 효율이 좋고 고온에서 손실이 작기 때문에 전기자동차 및 에어컨 컴프레서의 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 적용 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 FNIS와 적용제어를 이용하여 IPMSM의 드라이브 고성능 제어를 제시한다. 다양한 동작상태에서 Adaptive-FNIS의 양호한 성능을 확인한다.

2. Adaptive-FNIS 제어기

2.1 FNIS의 설계

FNIS는 신경회로망과 퍼지제어를 혼합 구성하며 강력한 표현의 유연성과 수치 처리능력을 가지고 있다. 그림 1은 FNIS의 구성을 나타내며 여기서 두 개의 입력변수는 오차  $e$ 와 오차의 변화분  $\dot{e}$  이고 출력변수는 제어변수  $u$ 이다.

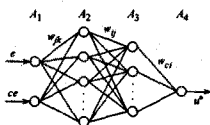


그림 1 FNIS 제어기의 구성

2.1.1 제어기의 조건부의 구현

그림 1에서  $A_1$ 층에서  $A_3$ 층 사이에 신경회로망은 퍼지룰의 조건부의 구현을 나타낸다. 조건부의 멤버쉽 함수를 효과적으로 설계하기 위하여 신경회로망의 구조를 간단하게 하고 수렴속도를 개선하기 위하여 클러스터링 방법을 적용한다. 표 1은 퍼지제어룰의 집합을 나타낸다.

표 1. 퍼지룰 표

출력	NL	NM	NS	ZE	PS	PM	PL
입력1	NL	NL	NL	NL	NL	NM	NS
입력2	NL	NL	NL	NL	NS	NS	ZE
입력3	NL	NL	NM	NS	ZE	PS	PM
입력4	ZE	NL	NM	NS	ZE	PS	PM
입력5	PS	NM	NS	ZE	PS	PM	PL
입력6	PM	NS	ZE	PS	PM	PL	PL
입력7	PL	ZE	PS	PM	PL	PL	PL

오차함수를 정의한 후, 오차를 최소화하기 위하여 다음 단계는 오차 역전과 알고리즘에 의해  $A_1$ 층과  $A_3$ 층 사이에 가중치  $w_{jk}$ 와  $w_{kj}$ 를 조절한다.

학습과정 동안 진동을 피하고 수렴속도를 개선하기 위하여 다음과 같은 모멘텀(momentum) 항으로 새로운 조절을 수행한다.

$$w_{jk}(t+1) = w_{jk}(t) + \Delta w_{jk} + \alpha[w_{jk}(t) - w_{jk}(t-1)] \quad (1)$$

$$w_{kj}(t+1) = w_{kj}(t) + \Delta w_{kj} + \alpha[w_{kj}(t) - w_{kj}(t-1)] \quad (2)$$

2.1.2 제어기의 결론부의 구현

그림 1에서  $A_3$ 층과  $A_4$ 층 사이의 신경회로망은 퍼지룰의 결론부의 구현을 나타낸다. 오차 역전과 알고리즘에 의해  $A_3$ 층과  $A_4$ 층 사이에 가중치  $w_{ci}$ 를 조절한다.

$$w_{ci}(t+1) = w_{ci}(t) + \Delta w_{ci} + \alpha[w_{ci}(t) - w_{ci}(t-1)] \quad (3)$$

2.2 Adaptive-FNIS의 설계

Adaptive-FNIS 제어기는 FNIS에 기준 모델을 설계하여 퍼지추론으로 구현할 수 있는 적용 메카니즘으로 구성한다. 드라이브 시스템의 속도성능은 기준모델의 속도와 추측속도의 오차에 의해 좌우된다.

$$em(kT) = \omega_m(kT) - \hat{\omega}_r(kT) \quad (4)$$

$$cem(kT) = em(kT) - em(kT-T) \quad (5)$$

퍼지 역모델은 오차  $em(kT)$ 를 사상하여 프로세서의 입력  $p(kT)$ 를 변화시키며  $em(kT)$ 를 영이 되도록 강제화시킨다. 역모델의 입력은 식(4)와 식(5)와 같이 오차와 오차 변화분으로 정의한다. 퍼지의 수행과정은 FNIS에서 사용한 방법과 유사하게 사용한다. 프로세서에서 변화  $p(kT)$ 는 입력오차  $em(kT)$ 에 기초하여 퍼지 역모델에 의해서 발생한다.

지식베이스의 수정자는  $p(kT)$ 에 따라서 FNIS의 지식베이스를 변화시킨다. 이 변화는 FNIS에서 출력의 멤버쉽 함수의 중앙을 수정하여 구현한다.

$$C_i(kT) = C_i(kT-T) + p(kT) \quad (6)$$

여기서 첨자  $i$ 는 역모델에 의해 동작하는  $i$ 번째 멤버쉽 함수를 나타낸다.

그림 2는 적응제어를 이용한 FNIS의 구조를 나타낸다. FNIS에 적응제어를 적용하여 룰 베이스의 규칙을 수정한다. 적응제어는 퍼지 역모델 및 지식베이스 수정자를 포함한다.

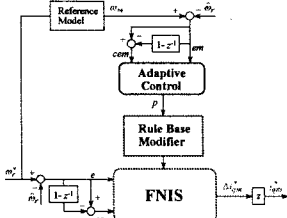


그림 2 적응제어에 의한 FNIS

### 3. 효율 최적화 제어

#### 3.1 손실과 효율 계산

정상상태에서 전류 식은 다음과 같다.

$$i_{dm} = i_{dm} + i_{dc} = i_{dm} - \frac{\omega_r L_d i_{qm}}{R_c} \quad (7)$$

$$i_q = i_{qm} + i_{qc} = i_{qm} + \frac{\omega_r (\phi_s + L_d i_{dm})}{R_c} \quad (8)$$

정상상태에서 동손 및 철손은 다음과 같다.

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

$$P_{fe} = R_c (i_{dc}^2 + i_{qc}^2) \quad (10)$$

정상상태에서 동손 및 철손은 다음과 같다.

$$P_{cu} = R_c (i_d^2 + i_q^2) \quad (11)$$

$$P_{fe} = R_c (i_{dc}^2 + i_{qc}^2) \quad (12)$$

전체 손실을 구하면 다음과 같다.

$$P_{total} = P_{cu} + P_{fe} = Ai_{dm}^2 + Bi_{qm}^2 + Ci_{dm} i_{qm} + Di_{dm} + Ei_{qm} + F \quad (13)$$

여기서, 지정한 계수는 다음과 같다.

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

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

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

토크로 표현된  $i_{qm}$ 을 구하면 다음과 같다.

$$i_{qm} = \frac{T_e}{P_n \{ \phi_s + X i_{dm} \}} = \frac{T}{K} \quad (14)$$

여기서, 지정한 계수는 다음과 같다.

$$T = \frac{T_e}{P_n}, \quad X = L_d (1 - \rho), \quad K = \phi_s + X i_{dm} \quad (15)$$

식(14)을 식(13)에 대입하여 정리하면 다음과 같다.

$$P_{total} = Ai_{dm}^2 + B \left( \frac{T}{K} \right)^2 + Ci_{dm} \frac{T}{K} + Di_{dm} + E \frac{T}{K} + F \\ = A \left( \frac{K - \phi_s}{X} \right)^2 + B \left( \frac{T}{K} \right)^2 + \frac{CT(K - \phi_s)}{KX} + \frac{D(K - \phi_s)}{X} + \frac{ET}{K} + F \quad (16)$$

#### 3.2 효율 최적화의 조건

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

$$\frac{dP_{total}}{di_{dm}} = 0 \quad (17)$$

전체손실인 식(17)을 편미분하여 얻은 결과는 다음과 같다.

$$\frac{\partial P_{total}}{\partial i_{dm}} = \frac{\partial P_{total}}{\partial K} \frac{\partial K}{\partial i_{dm}} \\ = \frac{1}{XK^3} [2AK^4 + (XD - 2A\phi_s)K^3 - 2BX^2T^2] = 0 \quad (18)$$

식(18)에서  $K$ 를 구한 다음,  $i_{dm}$ 을 구하면 다음과 같다.

$$i_{dm} = \frac{-2A\phi_s + XD + \sqrt{(XD - 2A\phi_s)^2 + 16ABX^2T^2}}{4AX} \quad (19)$$

그림 3은 본 논문에서 제시한 효율 최적화 제어에 의하여 속도제어를 수행하는 블록이다.

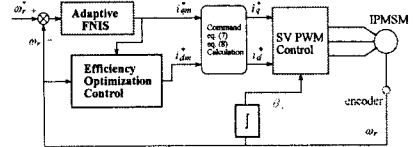


그림 3. 효율 최적화 제어에 의한 속도제어

## 4. 결과 분석

그림 4는 Adaptive-FNIS로 속도를 제어하며 부하토크를  $1[N \cdot m]$ 인가한 상태에서 4상한 운전에 대한 응답특성을 나타낸다. 그림 4(a)는 지령속도와 실제속도, 그림 4(b)는  $q$ 축 고정자 전류, 그림 4(c)는  $d$ 축 고정자 전류, 그림 4(d)는 총 손실을 나타낸다.  $i_{d0}$  제어로 운전하였을 경우 총 손실이 크게 나타난다.

그림 5는 그림 4와 같은 조건에서  $i_{d0}$  제어하여 효율 최적화를 수행하였다. 그림 5(c)에서  $d$ 축 고정자 전류가 효율 최적화 제어에 의해 양호하게 제어가 되고 있다. 그림 5(d)의 총 손실은  $i_{d0}$  제어로 운전 한 그림 4(d)와 비교하면 손실이 크게 저감되었다.

그림 6은 그림 4와 5의 운전에 따른 손실을 비교하여 나타낸다. 그림 6(a)는 동손, 그림 6(b)는 철손, 그림 6(c)는 총 손실을 나타낸다. 그림 6에서 A는  $i_{d0}$  제어로 운전한 경우이며, B는 효율 최적화 제어로 운전한 경우이다. 동손과 철손은 효율 최적화 제어를 하였을 경우 손실이 적게 나타나고 있다.

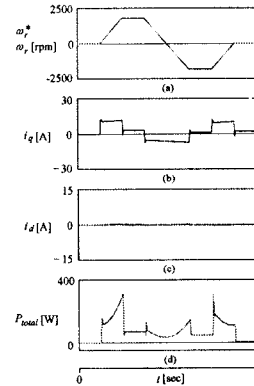


그림4. 4상한 운전의 대한 응답특성 ( $i_{d0}$  제어)

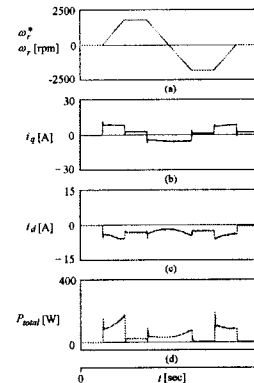


그림 5. 4상한 운전의 대한 응답특성(효율최적화 제어)

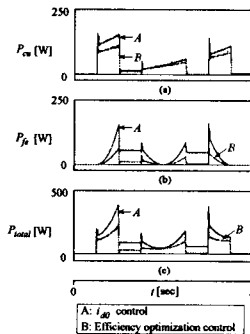


그림 6.  $i_d$  제어와 효율 최적 제어의 전체 손실 비교

그림 7은 Adaptive-FNIS, FNN, PI 제어기의 스텝 지령속도의 변화와 부하토크 인가에 따른 속도의 변화를 나타낸다. 0.2[sec]에 스텝 지령 속도를 1800[rpm]으로 운전하다가 0.6[sec]에서 0.8[sec] 동안 부하토크를 4[N·m]로 인가하였을 경우의 응답특성이다. 그림 7(a)는 지령속도와 실제속도, 그림 7(b)는  $q$  축 고정자 전류, 그림 7(c)는  $d$  축 고정자 전류 그리고 그림 7(d)는 발생토크를 나타내고 있다.

그림 8은 그림 7을 명확하게 나타내기 위하여 과도상태 부분을 나타낸다. 그림 8(a)는 그림 7의 0.38[sec]에서 0.54[sec]까지의 속도 지령에 따른 응답특성을 확대하여 나타내며, 그림 8(b)는 0.58[sec]에서 1[sec]까지의 부하토크 인가에 따른 응답특성을 나타낸다. Adaptive-FNIS 제어기는 종래의 FNN이나 PI제어기 보다 스텝 속도지령 및 부하 변화에 대한 응답특성이 양호하게 나타남을 알 수 있다.

그림 9는 Adaptive-FNIS 및 FNN, PI 제어기의 정역회전 운전의 응답특성을 나타낸다. 그림 9(a)는 Adaptive-FNIS, 그림 9(b)는 FNN, 그림 9(c)는 PI제어기의 지령속도와 실제속도, 그림 9(d)는 각각의  $q$  축 고정자 전류를 나타낸다. Adaptive-FNIS 제어기가 정역회전 운전에서도 FNN 및 PI제어기 보다 응답특성이 양호하게 나타난다.

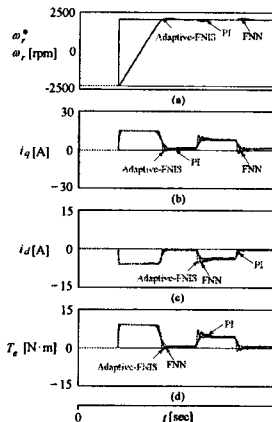


그림 7. Adaptive-FNIS, FNN, PI 제어기의 응답특성 비교

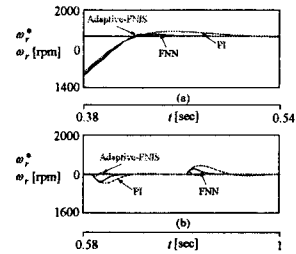


그림 8. Adaptive-FNIS, FNN, PI 제어기의 응답특성 비교

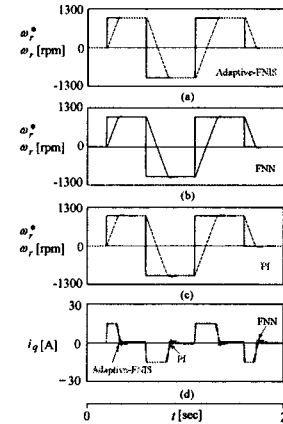


그림 9. Adaptive-FNIS, FNN, PI 제어기의 응답특성 비교

## 5. 결 론

본 논문에서는 IPMSM 드라이브의 효율 최적화 제어를 위하여 퍼지제어와 신경회로망을 이용한 FNIS에 적응제어를 적용하여 Adaptive-FNIS를 제시하였다. 효율 최적화 제어에서 손실은  $d$  축 전류의 최적화 제어에 의해 최소화하였다. 속도, 부하토크 변화 및 저항 및 관성과 같은 파라미터 변동에서 Adaptive-FNIS는 종래의 FNN, 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. Hirasa, "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. Cerrada 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. IPEC-Tokyo 2000, vol. 3, pp. 1207-1212, 1000.