

AFLC-FNN 제어기에 의한 IPMSM의 효율 최적화 제어

최정식, 고재섭, 이정호, 김종관, 박기태, 박병상, 정동화
순천대학교 공과대학 정보통신공학부

Efficiency Optimization Control of IPMSM with AFLC-FNN Controller

Jung Sik Choi, Jae Sub Ko, Jung Ho Lee, Jong Kwan Kim, Ki Tae Park, Byung Sang Park, Dong-Hwa Chung
School of Information & Communication Engineering, Suncheon National Univ.

Abstract - Interior permanent magnet synchronous motor(IPMSM) has become a popular choice in electric vehicle applications.

This paper proposes efficiency optimization control of IPMSM drive using AFLC-FNN(Adaptive Fuzzy Learning Control Fuzzy Neural Network)controller.

In order to maximize the efficiency in such applications, this paper proposes the optimal control method of the armature current. The optimal current can be decided according to the operating speed and the load conditions.

This paper proposes speed control of IPMSM using AFLC-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 AFLC-FNN controller, the operating characteristics controlled by efficiency optimization control are examined in detail.

1. 서 론

IPMSM(Interior PMSM)은 SPMSM에 비해 효율이 좋고 고온에서 손실이 작기 때문에 전기자동차 및 에어컨 컴프레서의 드라이브 등에 적용되고 있다.[1] 동작효율은 제어 방법과 최적화 제어방법에 최소화할 수 있는 손실에 관계된다.[2] PMSM 드라이브에서 제어 가능한 동손과 철손 손실을 최소화하기 위한 연구가 이루어졌다.[3]

산업 프로세서의 적용에는 부하 외란, 파라미터 변화 및 어떤 모델의 불확실성 등에 대하여 고성능과 강인성을 발휘할 수 있는 기법이 필요하다. 이러한 문제점을 해결하기 위하여 다양한 제어 기법들이 연구되었다.[4-5] 이러한 연구들은 간접백터에 의한 유도전동기의 드라이브 시스템에 적용하여 양호한 성능을 얻을 수 있었지만 더욱 우수한 결과를 얻기 위한 연구가 필요하다.

본 논문에서는 AFLC-FNN에 의한 IPMSM 드라이브의 효율 최적화 제어를 제시한다. IPMSM의 철손과 동손을 모델링하고 이 손실을 최소화하는 동작점에서 효율을 최대화할 수 있는 방법을 제시한다. PI 제어기에서 나타나는 문제점을 해결하기 위하여 신경회로망과 퍼지 제어를 혼합 적용한 FNN을 설계한다. 더욱 성능을 개선하기 위하여 AFLC를 이용하여 FNN 제어기의 파라미터를 갱신시킨다. 본 논문에서 제시한 제어기의 성능을 분석하고 그 결과를 제시한다.

2 효율 최적화 제어

2.1 손실과 효율 계산

효율은 정상상태에서 연속적인 운전할 경우에 중요하므로 전압방정식은 미분 항을 무시하고 정상상태만 고려한다.

$$v_d = R_s i_d - \omega_r L_q i_{qm} \tag{1}$$

$$v_q = R_s i_q + \omega_r L_d i_{dm} + \omega_r \phi_a \tag{2}$$

정상상태에서 전류 식은 다음과 같다.

$$i_d = i_{dm} + i_{dc} = i_{dm} - \frac{\omega_r L_q i_{qm}}{R_c} \tag{3}$$

$$i_q = i_{qm} + i_{qc} = i_{qm} + \frac{\omega_r (\phi_a + L_d i_{dm})}{R_c} \tag{4}$$

정상상태에서 동손 및 철손은 다음과 같다.

$$P_{cu} = R_s (i_d^2 + i_q^2) \tag{5}$$

$$P_{fe} = R_c (i_{dc}^2 + i_{qc}^2) \tag{6}$$

식(3)과 (4)를 식(5)와 (6)에 대입하여 전체 손실을 구하면 다음과 같다.

$$P_{total} = P_{cu} + P_{fe} = A i_{dm}^2 + B i_{qm}^2 + C i_{dm} i_{qm} + D i_{dm} + E i_{qm} + F \tag{7}$$

여기서, 지정한 계수는 다음과 같다.

$$\begin{aligned} A &= R_s + \frac{(\omega_r L_d)^2 (R_c + R_s)}{R_c^2}, & B &= R_s + \frac{(\omega_r L_q)^2 (R_c + R_s)}{R_c^2} \\ C &= \frac{2 \cdot R_s \omega_r L_d (1 - \rho)}{R_c}, & D &= \frac{2 \cdot \omega_r^2 \phi_a L_d (R_s + R_c)}{R_c^2} \\ E &= \frac{2 \cdot R_s \omega_r \phi_a}{R_c}, & F &= \frac{(\omega_r \phi_a)^2 (R_c + R_s)}{R_c^2} \end{aligned}$$

토크식에서 i_{qm} 을 구하면 다음과 같다.

$$i_{qm} = \frac{T_e}{P_n \{ \phi_a + X i_{dm} \}} = \frac{T}{K} \tag{8}$$

여기서, 지정한 계수는 다음과 같다.

$$T = \frac{T_e}{P_n}, \quad X = L_d (1 - \rho), \quad K = \phi_a + X i_{dm} \tag{9}$$

식(8)을 식(7)에 대입하여 정리하면 다음과 같다.

$$P_{total} = A i_{dm}^2 + B \left(\frac{T}{K} \right)^2 + C i_{dm} \frac{T}{K} + D i_{dm} + E \frac{T}{K} + F$$

$$= A \left(\frac{K - \phi_a}{X} \right)^2 + B \left(\frac{T}{K} \right)^2 + \frac{CT(K - \phi_a)}{KX} + \frac{D(K - \phi_a)}{X} + \frac{ET}{K} + F \quad (10)$$

2.2 효율 최적화의 조건

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

$$\frac{\partial P_{total}}{\partial i_{dm}} = 0 \quad (11)$$

전체손실인 식(11)을 편미분하여 얻은 결과는 다음과 같다.

$$\frac{\partial P_{total}}{\partial i_{dm}} = \frac{\partial P_{total}}{\partial K} \frac{\partial K}{\partial i_{dm}} = \frac{1}{\Delta K} \{ \Delta K \cdot A + (XD - 2A\phi_a)K - 2BX^2T^2 \} = 0 \quad (12)$$

식(12)에서 K 를 구한 다음, i_{dm} 을 구하면 다음과 같다.

$$i_{dm} = \frac{-(2A\phi_a + XD) + \sqrt{(XD - 2A\phi_a)^2 + 16ABX^2T^2}}{4AX} \quad (13)$$

그림 1은 본 논문에서 제시한 효율 최적화 제어에 의하여 속도제어를 수행하는 블록이다.

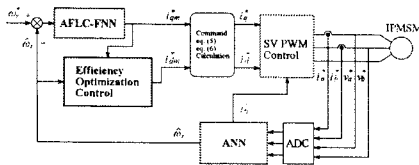


그림 1 효율 최적화 제어에 의한 속도제어

3. AFLC-FNN 제어기

AFLC-FNN 제어기는 FNN 제어기에 기준 모델을 설계하여 피추론으로 구현할 수 있는 적응 메카니즘으로 구성한다. 그림 2은 AFLC-FNN 제어기의 구조를 나타내었다.

$$em(kT) = \omega_m(kT) - \hat{\omega}_r(kT) \quad (14)$$

$$cem(kT) = em(kT) - em(kT - T) \quad (15)$$

여기서 오차 $em(kT)$ 는 각 시간순서에서 얻어지는 필요한 속도성능의 측정 정도이다.

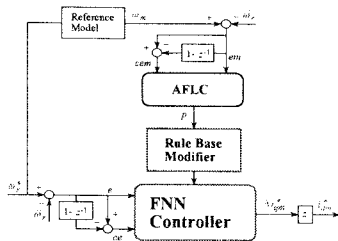


그림 2 AFLC에 의한 FNN 제어기

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

$$C_i(kT) = C_i(kT - T) + p(kT) \quad (16)$$

여기서 첨자 i 는 역모델에 의해 동작하는 i 번째 멤버십 함수를 나타낸다.

4. ANN에 의한 속도 추정

ANN은 인간 두뇌의 간단한 모델에 의해 사고하는 구조로 이루어진 컴퓨팅 시스템이다. ANN은 비선형 동적 시스템의 파라미터를 추정 및 제어를 하는데 사용한다.[6]

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

$$\begin{aligned} \hat{\omega}_r(k+1) &= \hat{\omega}_r(k) + \Delta \hat{\omega}_r(k) \\ &= \hat{\omega}_r(k) - \frac{\Delta W_2(k)}{T} \\ &= \hat{\omega}_r(k) - \frac{\eta}{T} \{ [\hat{\phi}_q(k) - \hat{\phi}_q(k-1)] [\hat{\phi}_d(k-1)] - [\hat{\phi}_d(k) - \hat{\phi}_d(k-1)] [\hat{\phi}_q(k-1)] \} \\ &\quad - \frac{\alpha}{T} \Delta W_2(k-1) \end{aligned} \quad (17)$$

추정속도를 이용한 회전자 자속의 위치는 다음과 같다.

$$\hat{\theta}_r(k+1) = \hat{\theta}_r(k) + T \cdot \hat{\omega}_r(k) \quad (18)$$

5. 시스템의 성능결과

그림 3은 부하토크 $1[N \cdot m]$ 에서 속도 $1800[\text{rpm}]$ 으로 정상상태에서 운전할 경우 i_{dm} 의 변화에 따른 전체손실 P_{total} , 효율 η 및 i_{qm} 의 변화를 나타낸다. 전기적인 손실이 최소가 되는 점에서 효율은 최대가 되는 점이 존재한다. 따라서 이 i_{dm} 의 최적점을 찾아 운전을 하게 되면 효율 최적화 제어를 구현할 수 있다.

그림 4는 부하토크 $1[\text{pu}]$ 에서 속도 변화에 따른 정상상태에서 i_d 와 i_q 의 변화를 나타낸다. $i_d = 0(i_{d0})$ 제어에서 전기자 전류의 d 축 성분인 i_d 는 영으로 유지되고 있다. 그러나 본 연구에서 제시한 효율 최적화 제어(i_{dopt})의 i_d 는 적절하게 제어되고 있으며 속도의 증가에 따라 음의 방향으로 증가한다.

그림 5는 부하토크 $1[\text{pu}]$ 에서 속도 변화에 따른 정상상태에서 ω_r , P_{cu} , P_{fe} 의 변화를 나타낸다. 음의 d 축 전류는 양의 리터턴스 토크를 발생하게 되며 동손은 약간 작게 나타난다. 또한 음의 d 축 전류는 자속을 감소시키며 d 축 전기자반작용의 감자작용으로 인한 약게자 영향이 나타나게 되어 철손도 i_{d0} 제어 보다 매우 작게 나타난다. i_{d0} 제어에서 철손은 일정한 부하토크에서 속도의 증가에 따라 매우 증가하게 되지만 i_{dopt} 제어에서는 매우 감소하며 고속에서는 현저하게 감소하는 현상을 알 수 있다. 따라서 효율 최적화 제어에 의한 i_{dopt} 제어가 종래의 i_{d0} 제어 보다 효율이 매우 향상되고 있으며 정상상태에는 효율이 5-10[%] 정도로 증가한다.

그림 6은 속도 $1800[\text{rpm}]$ 에서 부하토크의 변화에 따른 정상상태에서 η , P_{cu} , P_{fe} 의 변화를 나타낸다. 일정 속도에서 전기자전류가 증가하면 부하토크가 증가하게 되어 철손과 동손이 증가한다. 이 손실은 리터턴스 토크와 약게자 영향으로 제시한 i_{dopt} 제어에서는 감소한다. 본 연구에서 제시한 효율 최적화 제어에 의한 효율이 5-10[%] 정도로 증가한다.

그림 7은 AFLC-FNN 제어기로 속도를 제어하며 부하토크를

1[N·m]인가한 상태에서 4상한 운전에 대한 응답특성을 나타낸다. 그림 7(d)는 총 손실을 나타낸다. i_{d0} 제어로 운전하였을 경우 총 손실이 크게 나타난다.

그림 8은 그림 7과 같은 조건에서 i_{d0} 제어하여 효율 최적화를 수행하였다. 그림 8(d)의 총 손실은 i_{d0} 제어로 운전한 그림 7(d)와 비교하면 손실이 크게 저감되었다.

동손과 철손이 i_{d0} 제어로 운전할 경우보다 효율 최적화 제어를 하였을 경우 손실이 적게 나타나고 있다.

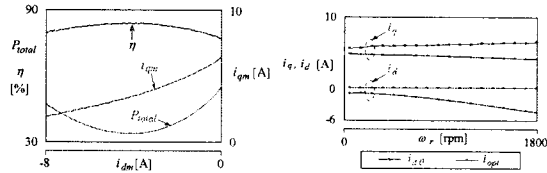


그림 3 정격 속도와 부하토크 1[N·m]에서 i_{dm} 함수로서 손실 효율 및 i_q 의 변화

그림 4 부하토크 1[pu]에서 속도에 따른 i_d 과 i_q 의 변화의 비교

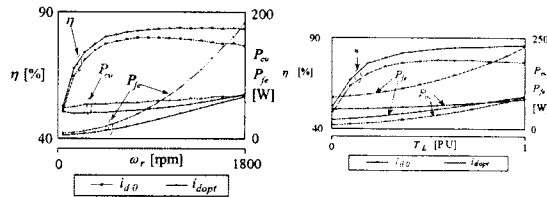


그림 5 속도 변화에 따른 ω_r , P_e , P_f 의 변화의 비교

그림 6 속도 1800[rpm]에서 부하토크에 따른 ω_r , P_e , P_f 의 변화의 비교

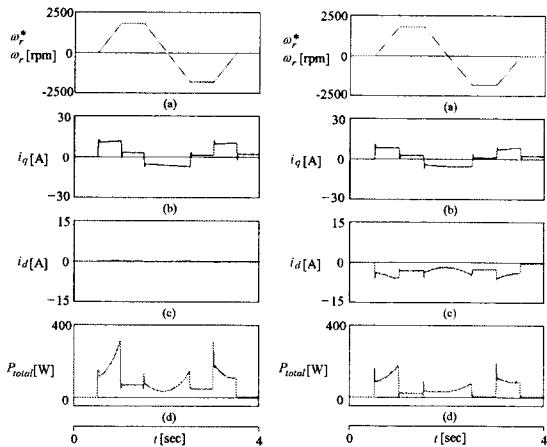


그림 7 4상한 운전의 대한 응답특성 (i_{d0} 제어)

그림 8 4상한 운전의 대한 응답특성 (효율최적화 제어)

그림 9는 AFC-FNN, FNN, PI 제어기의 스텝 지령속도의 변화와 부하토크 인가에 따른 속도의 변화를 나타낸다. 0.2[sec]에 스텝 지령 속도를 1800[rpm]으로 운전 하다가 0.6[sec]에서 0.8[sec] 동안 부하토크를 4[N·m]로 인가하였을 경우의 응답특성이다. AFC-FNN 제어기는 종래의 FNN이나 PI제어기 보다 스텝 속도지령 및 부하 변화에 대한 응답특성이 양호하게 나타남을 알 수 있다.

그림 10은 ANN을 이용한 IPMSM 드라이브의 속도 추정을 나타내고 있다. 지령속도를 0.2[sec]에 1800[rpm]으로 운전 중, 0.6[sec]에서 0.8[sec]동안 부하토크를 4[N·m]인가한 후 1[sec]에 -100[rpm]으로 다시 1.5[sec]에 100[rpm]으로 운전하였을 경우의 응답특성이다. 추정속도의 속도오차는 실제속도의 1%

이내로 양호한 추정 성능을 보인다.

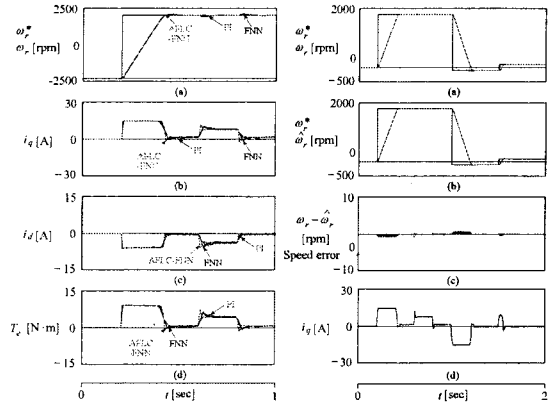


그림 9 AFC-FNN, FNN, PI 제어기의 응답특성 비교

그림 10 ANN을 이용한 IPMSM의 속도 추정

6. 결 론

본 논문에서는 AFC-FNN 제어기를 이용하여 IPMSM 드라이브의 효율 최적화 제어를 제시하였다. 제어가 가능한 동손과 철손은 전기자전류의 최적화 제어에 의해 최소화하여 효율 최대화를 이룩할 수 있었으며 효율 최적화 제어를 적용하여 양호한 응답특성을 얻을 수 있었다. 또한, AFC-FNN을 이용하여 IPMSM의 고성능 속도를 제어하여 종래의 PI 및 FNN 제어기 보다 성능이 우수한 결과를 얻었으며 ANN을 이용하여 속도를 추정하였다. ANN을 이용하여 지령속도의 변화에 추정속도는 실제속도에 양호하게 추정하였다. 따라서 본 논문에서 제시한 제어 기법의 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] A. Kusko and D. Galler, "Control means for minimization of losses in ac and dc motor drives," IEEE Trans. IA, vol. 19, pp. 561-570, 1983.
- [3] Y. Nakamura, T. Kudo, F. Ishibashi and S. Hibino, "High-efficiency drive due to power factor control of a permanent magnet synchronous motor," IEEE Trans., PE, vol. 10, pp. 247-253, 1995.
- [4] H. G. Lee, J. C. Lee and D. H. Chung, "New fuzzy controller for high performance of induction motor drive," The journal of KIIS, vol. 17, no. 4, pp. 87-93, 2002.
- [5] H. G. Lee, J. C. Lee and D. H. Chung, "Adaptive FNN controller for speed control of IPMSM drive," The Trans. of KIEE, vol. 41-SC, no. 3, pp. 39-46, 2004.
- [6] 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.