

HIC를 이용한 IPMSM 드라이브의 효율 최적화 제어

백정우, 고재섭, 최정식, 강성준, 장미금, 정동화
순천대학교

Efficiency Optimization Control of IPMSM Drive using HIC

Jung-Woo Baek, Jae-Sub Ko, Jung-Sik Choi, Sung-Joon Kang, Mi-Geum Jang, Dong-Hwa Chung
Sunchon National University

Abstract - This paper proposes efficiency optimization control of IPMSM drive using hybrid intelligent controller(HIC). The design of the speed controller based on fuzzy-neural network that is implemented using fuzzy control and neural network. The design of the current based on adaptive fuzzy control using model reference and the estimation of the speed based on neural network using ANN 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 ALM-FNN, current control of model reference adaptive fuzzy control(MTC) and estimation of speed using ANN controller. The proposed control algorithm is applied to IPMSM drive system controlled HIC, the operating characteristics controlled by efficiency optimization control are examined in detail.

1. 서 론

IPMSM(Interior Permanent Magnet Synchronous Motor)의 ASD(Adjustable Speed Drive)는 대 전력밀도, 고 효율, 개선된 과도성 및 신뢰성이 유도전동기 드라이브 보다 우수한 장점 때문에 다양한 산업분야에 광범위하게 적용되고 있다.[1] 전동기 손실은 기계손, 동손, 철손 및 표류손으로 구성되어 있다. 기계손은 회전자 속도에 의존하고 제어할 수 없다. 제어 가능한 손실은 동손과 철손이다. 잘 알려진 최적 제어 기법은 최대 토크를 찾기 위하여 전류각을 변수로서 이용하는 MTPA(Maximum Torque per Ampere)이다.[2] 전류조건에서 동손 최소화는 MTPA와 같은 결과를 가져온다. 그러나 손실 최소화는 간단하지 않으며 원칙적으로 조건에 의한 비선형 최적화 문제이다. 토크와 속도를 증가시키면 인버터의 전압과 전류를 최대로 이용해야 한다. 지령 d와 q 축 전류의 2차 손실함수를 세우고 손실을 최소화하는 지령 d축 전류를 해석적으로 구했다.[3] IPMSM 드라이브에서 이러한 손실을 최소화하기 위한 연구가 다양하게 이루어졌다.[4] 최근 퍼지제어, 신경회로망 및 유전자 알고리즘 등을 이용한 인공지능 제어는 전력전자 시스템의 성능을 향상시킬 수 있는 중요한 기법으로 인식되고 있다. 그리고 이들 기법간의 상호 혼합한 방식은 적용성 및 강인성이 요구되는 유도전동기 드라이브에서 진가를 유감없이 발휘될 전망이다.[5]

본 논문에서는 HIC(Hybrid Intelligent Controller)에 의한 IPMSM 드라이브의 효율 최적화 제어를 제시한다. IPMSM의 철손과 동손을 모델링하고 이 손실을 최소화하는 동작점에서 효율을 최대화할 수 있는 방법을 제시한다. ALM-FNN(Adaptive Learning Mechanism-Fuzzy Neural Network) 제어기는 IPMSM의 속도를 제어하고 출력성분인 지령토크를 이용하여 효율 최적화 제어를 수행한다. 최대 효율동작을 위하여 최적 d 축 전류를 결정하고 이 전류를 각 제어모드에서 사용한다. 그리고 MFC(Model Reference Adaptive-Fuzzy Control) 제어기는 전류를 제어하고 ANN은 속도를 추정한다. 본 논문의 효율성을 입증하기 위하여 종래의 방식과 비교하고 결과를 제시한다.

2. 효율 최적화 제어

2.1 손실과 효율계산

가변속 드라이브 시스템의 효율은 제어방법과 함께 매우 중요한 요인이다. 효율은 정상상태에서 연속적인 운전할 경우에 중요하므로 전압 및 전류방정식은 미분 항을 무시하고 정상상태만 고려한다.

$$v_d = R_s i_d - \omega_r L_q i_{qm}, \quad v_q = R_s i_q + \omega_r L_d i_{dm} + \omega_r \phi_a \quad (1)$$

$$i_d = i_{dm} + i_{dc} = i_{dm} - \frac{\omega_r L_q i_{qm}}{R_c}, \quad i_q = i_{qm} + i_{qc} = i_{qm} + \frac{\omega_r (\phi_a + L_d i_{dm})}{R_c} \quad (2)$$

정상상태에서 동손 및 철손은 다음과 같다.

$$P_{cu} = R_s (i_d^2 + i_q^2), \quad P_{fe} = R_c (i_{dc}^2 + i_{qc}^2) \quad (3)$$

식(2)을 식(3)에 대입하여 전체 손실을 구하면 다음과 같다.

$$P_{total} = P_{cu} + P_{fe} = A i_{dm}^2 + B i_{qm}^2 + C i_{dm} i_{qm} + D i_{dm} + E i_{qm} + F \quad (4)$$

2.2 효율 최적화 조건

기계적인 손실은 제어가 불가능하지만 전기적인 손실은 전류벡터 제어에 의하여 제어가 가능하다. 전기적인 손실은 최적 전류벡터 제어에 의하여 최소화할 수 있다면 효율은 최대가 된다. 따라서 손실을 최소화하는 조건은 i_{dm} 로 손실 P_{total} 을 한번 미분하여 영으로 두면 얻을 수 있다.

$$\frac{dP_{total}}{di_{dm}} = 0 \quad (5)$$

전체손실인 식(5)을 편미분하여 얻은 결과는 다음과 같다.

$$\frac{\partial P_{total}}{\partial i_{dm}} = \frac{1}{XK^3} \{2AK^4 + (XD - 2A\phi_a)K^3 - 2BX^2T^2\} = 0 \quad (6)$$

식(6)에서 K 를 구한 다음, i_{dm} 을 구하면 다음과 같다.

$$i_{dm} = \frac{-(2A\phi_a + XD) + \sqrt{(XD - 2A\phi_a)^2 + 16ABX^2i_{qm}^2}}{4AX} \quad (7)$$

식(7)에서 구한 i_{dm} 이 전체손실을 최소화하는 최적전류이며 이를 사용하면 효율을 최대화할 수 있다. 실제 제어할 수 있는 전류인 i_d 와 i_q 는 최적전류인 i_{dm} 과 i_{qm} 을 구한 후, 식(2)에서 얻을 수 있다.

그림 1은 본 논문에서 제시한 IPMSM 드라이브의 효율 최적화 제어를 위한 전체 시스템을 나타낸다. 전동기의 회전속도는 ANN 제어기의 속도추정을 이용하여 얻을 수 있다.[5]

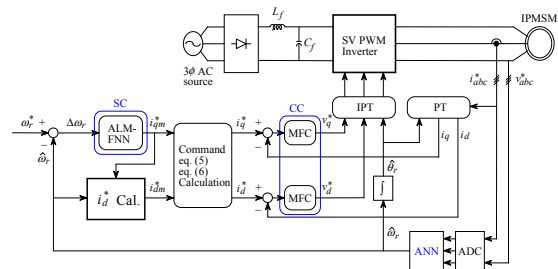


그림 1 IPMSM 드라이브의 효율 최적화 제어 시스템

3. HIC의 설계

IPMSM 드라이브는 과도 특성에서 다양한 속도 추정능력, 부하 및 관성 등 파라미터의 변동에도 고성능 및 강인성이 요구된다. ALM-FNN 제어기는 FNN 제어기에 기준 모델을 설계하여 퍼지추론으로 구현할 수 있는 적응 메카니즘으로 구성한다. 그림 2는 ALM-FNN 제어기의 구조를 나타낸다. 드라이브 시스템의 속도성능은 기준모델의 속도와 추정속도의 오차에 의해 좌우된다.

$$em(kT) = \omega_m(kT) - \hat{\omega}_r(kT) \quad (8)$$

$$cem(kT) = em(kT) - em(kT - T) \quad (9)$$

여기서 오차 $em(kT)$ 는 각 시간순에서 얻어지는 필요한 속도성능의 추정 정도이다. 성능이 만족할 경우인 $em(kT) = 0$ 에서 ALM은 FNN 제어기에서 수정할 필요가 없다. 그렇지 않으면 ALM은 요구되는 속도성능을 얻기 위하여 FNN 제어기의 룰 베이스를 동조시켜 수정을 해야 한다.

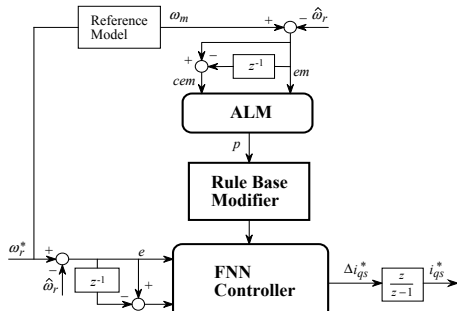


그림 2 ALM에 의한 FNN 제어기

퍼지 역모델은 오차 $em(kT)$ 를 사상하여 프로세서의 입력 $p(kT)$ 를 변화시키며 $em(kT)$ 를 영이 되도록 강제화 시킨다. 역모델의 입력은 식(8) 및 식(9)과 같이 오차와 오차 변화분으로 정의한다. 퍼지의 수행 과정은 FNN 제어기에서 사용한 방법과 유사하게 사용한다. 프로세서에서 변화 $p(kT)$ 는 입력오차 $em(kT)$ 에 기초하여 퍼지 역모델에 의해서 발생한다. 지식베이스의 수정자는 $p(kT)$ 에 따라서 FNN 제어기의 지식베이스를 변화시킨다. 이 변화는 FNN 제어기에서 출력의 멤버십 함수의 중량을 수정하여 구현한다.

$$C_i(kT) = C_i(kT - T) + p(kT) \quad (10)$$

여기서 첨자 i 는 역모델에 의해 동작하는 i 번째 멤버십 함수를 나타낸다. 여기서 각 부분 변화는 각 시간에서 이루어진다. 이 방법에서 FNN 제어기는 요구되는 $i_{qs}^*(kT)$ 를 발생하기 위하여 강제화 시킨다. 이는 기준모델과 같이 동작시키기 위하여 전동기를 강제화 시킨다.

적용 시스템의 적용과정은 2개의 퍼지제어기로 동작한다. 그림 3은 두 개의 퍼지동작의 상호작용을 나타내며 DFC(Direct Fuzzy Controller)는 종래의 일반적인 퍼지제어기이고 AFC는 기준 모델을 고려한 적응 퍼지제어기를 나타낸다.

DFC 알고리즘에 의한 출력은 $\Delta v_{qd1}^*(k)$ 이며 AFC에 의한 출력은 $\Delta v_{qd2}^*(k)$ 이다. 이 두 출력을 합하여 적분기를 통해 지령 d, q 축 전압을 얻는다.

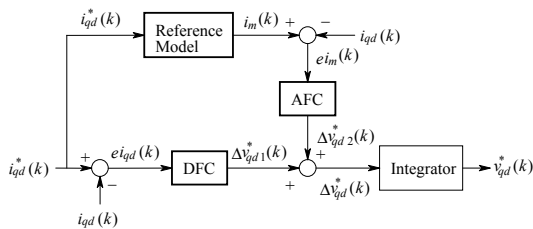


그림 3 MFC의 설계

4. 시스템 성능 및 결과

그림 4는 ALM-FNN, FNN 및 PI 스텝 지령속도의 변화와 부하토크 인가에 대한 속도의 변화를 나타낸다. 0.2[sec]에 지령속도를 1800[rpm]으로 운전 중 0.6-0.8[sec] 동안 부하토크 4[N.m]를 인가하였을 경우의 응답특성이다. 그림 4(a)는 지령속도와 추정속도, 4(b)는 d 축 전류를 나타내고 있다. 그림 5는 그림 4를 명확하게 나타내기 위해 과도상태 부분을 확대하여 나타낸 것이다. ALM-FNN 제어기는 종래의 FNN 및 PI 제어기에 비해 지령속도와 부하변화에 대하여 오버슈트가 적고 빠르게 안정화 되어 양호한 응답특성을 나타내고 있다.

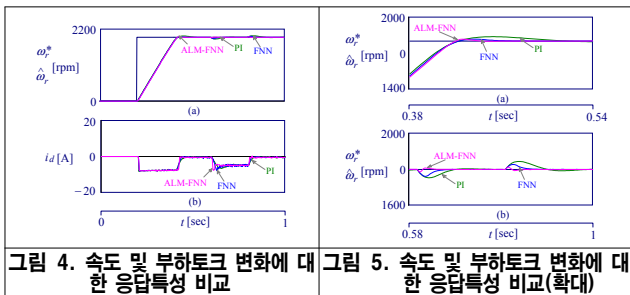


그림 4. 속도 및 부하토크 변화에 대한 응답특성 비교

그림 5. 속도 및 부하토크 변화에 대한 응답특성 비교(확대)

그림 6은 ALM-FNN 제어기로 속도를 제한한 상태에서 4상한 운전에 대한 응답특성을 나타내고 있다. 그림 6(a)는 지령속도와 실제속도, 그림 6(b)는 d 축 고정자 전류, 그림 6(c)는 총 손실을 나타낸다. i_{d0} 제어로 운전하였을 경우 총 손실이 크게 나타낸다. 그림 7은 그림 6과 같은 조건에서 i_{dopt} 로 효율 최적화 제어를 수행한 결과를 나타낸다. 그림 7(b)에서 d 축 고정자 전류가 효율 최적화 제어에 의해 양호하게 제어가 되고 있다. 그림 7(c)의 총 손실은 i_{d0} 제어로 운전 한 그림 6(c)과 비교하면 손실이 크게 감소되었다.

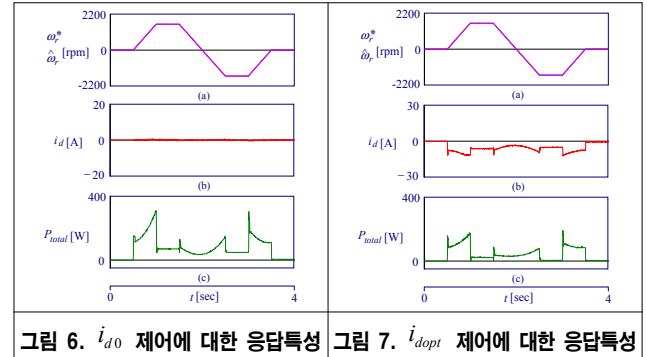


그림 6. i_{d0} 제어에 대한 응답특성

그림 7. i_{dopt} 제어에 대한 응답특성

그림 8과 그림 9는 정·역 운전에 대한 전류 응답특성을 나타낸다. 그림 8은 PI 제어, 그림 9는 MFC의 응답특성을 나타낸 것으로서 그림 (a)은 지령속도와 추정 속도 그림(b)은 a상의 전류 오차, 그림(c)은 스위칭 시간을 나타내고 있다. 그림 8(b)과 그림 9(b)를 비교하면 제시한 MFC 제어기에 의한 전류 오차가 종래의 PI 제어기에 의한 전류오차보다 작게 나타나고 있음을 알 수 있다.

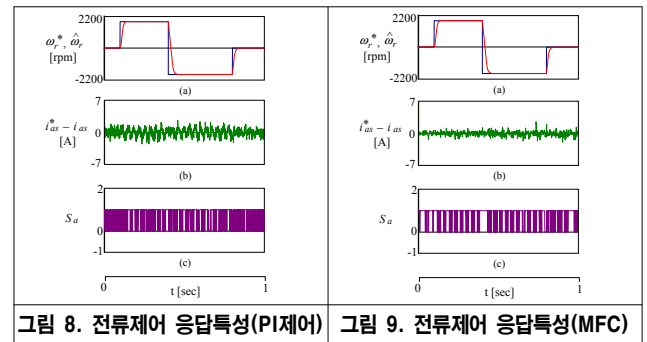


그림 8. 전류제어 응답특성(PI제어)

그림 9. 전류제어 응답특성(MFC)

5. 결론

본 논문에서는 HIC 제어기를 이용하여 IPMSM 드라이브의 효율 최적화 제어를 제시하였다. 제시한 HIC 제어기는 ALM-FNN 제어의 속도제어기와 MFC 전류제어기로 구성된다. 제어가 가능한 전기적인 손실은 철손과 동손이며, 이 손실은 전기자 전류의 최적화 제어에 의해 최소화 하였다. 손실 최소화는 효율 최대화를 이룰 수 있으며 효율최적화 제어를 적용하여 양호한 응답특성을 얻을 수 있었다. 또한 제시한 ALM-FNN의 속도제어기는 종래의 PI 및 FNN 제어기 보다 우수한 성능결과를 얻을 수 있었으며, MFC 전류 제어기는 종래의 PI 제어기보다 전류 오차가 작게 나타남으로서 고성능 및 강인성 제어를 확인할 수 있었다. 따라서 본 논문에서 제시한 HIC 제어기의 타당성을 입증할 수 있었다.

[참 고 문 헌]

- [1] M. Lei, M. Sanada, S. Morimoto and Y. Takeda, "Advantages of IPMSM with adjustable PM armature flux linkage in efficiency improvement and operating range extension," Proceedings of the PCC Osaka 2002, vol. 1, pp. 136-141, 2002.
- [2] S. Morimoto, Y. Tong, Y. Takeda and T. Hirasu, "Loss minimization control of permanent magnet synchronous motor drives," IEEE Trans. on IA, vol. 41, no. 5, pp. 511-517, 1994.
- [3] C. Mademlis and N. Margaris, "Loss minimization in vector-controlled interior permanent magnet synchronous motor drives," IEEE Trans. on IE, vol. 49, no. 6, pp. 1344-1347, 2002.
- [4] C. Cavallaro, A. O. D. Tommaso, R. Miceli, A. Raciti, G. R. Galluzzo and M. Trapanese, "Efficiency enhancement of permanent-magnet synchronous motor drives by online loss minimization approaches," IEEE Trans. on IE, vol. 52, no. 4, pp. 1153-1160, 2005.
- [5] H. G. Lee, S. M. Nam, J. S. Ko, J. S. Choi, J. C. Lee and D. H. Chung, "The speed control and estimation of IPMSM using adaptive FNN and ANN," ICCAS 2005, p. 134, 2005.