

## 퍼지제어와 손실최소화 기법을 이용한 IPMSM 드라이브의 실시간 효율최적화 제어

강성준\*, 고재섭\*, 장미금\*\*, 김순영\* 문주희\*, 이진국\*, 정동화\*  
 순천대학교\*, 전자부품연구원\*\*

### On-line Efficiency Optimization of IPMSM drive using Fuzzy Control and Loss Minimization Method

Seong-Jun Kang\*, Jae-Sub Ko\*, Mi-Geum Jang\*\*, Soon-Young Kim\*, Ju-Hui Mun\*, Jin-Kook Lee\*, Dong-Hwa Chung\*  
 Suncheon National University\*, Korea Electronics Technology Institute\*\*

**Abstract** - Interior permanent magnet synchronous motor(IPMSM) adjustable speed drives offer significant advantages over induction motor drives in a wide variety of industrial applications such as high power density, high efficiency, improved dynamic performance and reliability. This paper proposes on-line efficiency optimization of IPMSM drive using fuzzy logic control(FLC) and the loss minimization method. In order to optimize the efficiency the loss minimization algorithm is developed based on motor model and operating condition. The  $d$ -axis armature current is utilized to minimize the losses of the IPMSM in a closed loop vector control environment. The controllable electrical loss which consists of the copper loss and the iron loss can be minimized by the optimal control of the armature current. The minimization of loss is possible to realize efficiency optimization control for the proposed IPMSM. The optimal current can be decided according to the operating speed and the load conditions. The proposed control algorithm is applied to IPMSM drive system and the operating characteristics controlled by the loss minimization method and FLC 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 과도성능 및 신뢰성이 유도전동기 드라이브보다 우수한 장점 때문에 다양한 산업분야에 광범위하게 적용되고 있다.[1] IPMSM의 효율 개선은 매우 중요하며 특히 축전지를 전원으로 하는 드라이브에서는 더욱 중요하다. 따라서 효율을 개선시키기 위한 연구가 많이 이루어졌다. IPMSM의 구조가 다양하게 개발되었으며 최적의 회전자 구조를 설계하는데 주로 많은 노력을 기울였다. 그러나 효율은 구조의 개선만으로는 한계가 있으므로 제어기법에 의한 전동기의 동작원리에 연계하여 개선될 수 있어야 한다. 전동기 손실은 기계손, 동손, 철손 및 표류손으로 구성되어 있다. 기계손은 회전자 속도에 의존하고 제어할 수 없다. 제어 가능한 손실은 동손과 철손이다. 손실 최소화는 간단하지 않으며 원천적으로 조건에 의한 비선형 최적화 문제이다. 토크와 속도를 증가시키면 인버터의 전압과 전류를 최대로 이용해야 한다. 여기서 손실 최소화의 해는 전압과 전류의 조건 내부에서 구해야 한다. 계자 포화와 계자 간 간섭이 최적화 문제를 더욱 복잡하게 한다. 지령  $d$ 와  $q$ 축 전류의 2차 손실함수를 세우고 손실을 최소화하는 지령  $d$ 축 전류를 해석적으로 구했다.[2] 온라인 손실 최소화 알고리즘을 제시하고 효율 향상을 위하여 실험적으로 구현하였다.[3] IPMSM 드라이브에서 이러한 손실을 최소화하기 위한 연구가 다양하게 이루어졌다.[4-5] IPMSM 드라이브의 손실 최소화 조건은 고차방정식으로 나타나므로 계산 시간이 많이 소요되고 실제치와 오차가 발생하며 전동기의 운전 상태에서 실제적으로 적용하기가 어렵다. 본 논문에서는 FLC(Fuzzy Logic Control)와 손실최소화 기법을 이용한 실시간 IPMSM 드라이브의 효율최적화 제어를 제시한다. IPMSM의 철손과 동손을 모델링하고 이 손실을 최소화하여 각 동작점에서 효율을 극대화 할 수 있는 손실 최소화 기법을 제시한다. 손실 최소화 기법은 IPMSM 동작상태에 따라 최적의  $d$ 축 전류를 결정하고 이 전류를 각 제어모드에서 사용한다. 본 논문의 효용성을 입증하기 위하여 종래의 방식과 비교하여 그 결과를 제시한다.

#### 2. 손실 최소화 기법

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

$$v_d = R_s i_d - \omega_r L_q i_{qm} \quad (1)$$

$$v_q = R_s i_q + \omega_r L_d i_{dm} + \omega_r \phi_a \quad (2)$$

정상상태에서 전류 식은 다음과 같다.

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

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

정상상태에서 동손, 철손 및 기계손 다음과 같다.

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

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

$$P_m = \omega_r T_L \quad (7)$$

IPMSM의 출력과 효율은 다음 식과 같다.

$$P_L = P_e + P_m \quad (8)$$

$$P_o = \omega_r T_e \quad (9)$$

$$\eta = \frac{P_o}{P_o + P_L} \times 100[\%] \quad (10)$$

IPMSM 드라이브의 제어 가능한 전기적인 손실  $P_e$ 를 최소화하여 효율은 최대화할 수 있다. 정상상태에서  $P_e$ 를 한번 미분하여 영으로 두고 풀면 효율 최대화 조건을 얻을 수 있다.

$$\frac{\partial P_e}{\partial i_{dm}} = 0, \quad T_e, \omega_r = \text{constant} \quad (11)$$

결과적으로 손실 최소화 조건은 다음과 같다.

$$XY - T_e^2 Z = 0 \quad (12)$$

여기서  $X$ ,  $Y$  및  $Z$ 는 다음 식과 같다.

$$X = P_n^2 [R_a R_c^2 i_{dm} + \omega_r^2 L_d (R_a + R_c) (L_d i_{dm} + \phi_a)] \quad (13)$$

$$Y = [\phi_a + (1 - \rho) L_d i_{dm}]^2 \quad (14)$$

$$Z = [R_a R_c^2 + (R_a + R_c) (\omega_r \rho L_d)^2] (1 - \rho) L_d \quad (15)$$

전류  $i_{qm}$ 은 다음과 같다.

$$i_{qm} = \frac{T_e}{P_n [\phi_a + \omega_r^2 L_d i_{dm} (1 - \rho)]} \quad (16)$$

전동기를 비돌극형이라고 고려하면  $L_q = L_d$ 가 되고  $Z$ 는 영이 되고

$Y$  항은  $\phi_a^2$  이 된다. 조건  $X=0$ 는 최적  $d$  축 전류  $i_{dm}$ 을 얻을 수 있다.

$$i_{dm} = -\frac{\omega_r^2 L_d (R_s + R_c) \phi_a}{R_s R_c + \omega_r^2 L_d^2 (R_s + R_c)} \quad (17)$$

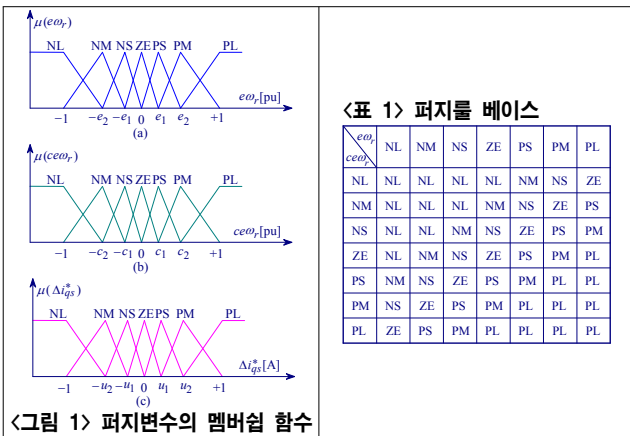
### 3. FLC 제어기 설계

FLC의 입력은 속도오차  $e(kT)$ 와 속도오차의 변화분  $ce(kT)$ 는 다음 식으로 정의한다.

$$e(kT) = \omega_r^*(kT) - \hat{\omega}_r(kT) \quad (18)$$

$$ce(kT) = e(kT) - e(kT - T) \quad (19)$$

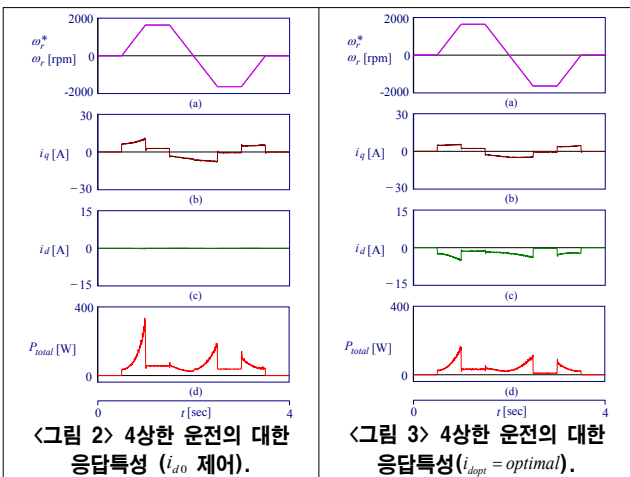
FLC의 출력은  $\Delta i_{qs}^*$ 이며 제어신호는 이를 적분하여  $i_{qs}^*$ 를 얻는다. 각 룰 베이스는 7개의 퍼지집합으로 나눈다. 그림 1은 멤버십 함수를 나타내며 그림 1(a)은 속도오차, 그림 1(b)은 속도오차의 변화분이며 그림 1(c)은 제어변수를 나타낸다. 표 1은 퍼지의 룰 베이스를 나타낸다.



<그림 1> 퍼지변수의 멤버십 함수

### 3. 시스템 성능결과

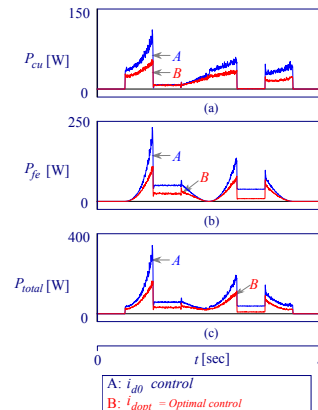
그림 2는 FLC 제어기로 속도를 제어하며 4상한 운전에 대한 응답특성을 나타낸다. 그림 2(a)는 지령속도와 실제속도, 그림 2(b)는  $q$  축 고정자 전류, 그림 2(c)는  $d$  축 고정자 전류, 그림 2(d)는 총 손실을 나타낸다.  $i_{d0}$  제어로 운전하였을 경우 총 손실이 크게 나타난다. 그림 3은 그림 2와 같은 조건에서 손실 최소화를 통한 효율 최적화를 수행하였다. 그림 3(c)에서  $d$  축 전류가 효율 최적화 제어에 의해 양호하게 제어가 되고 있다. 그림 3(d)의 총 손실은  $i_{d0}$  제어로 운전한 그림 2(d)와 비교하면 손실이 크게 저감되었다.



<그림 2> 4상한 운전의 대한 응답특성 ( $i_{d0}$  제어).

<그림 3> 4상한 운전의 대한 응답특성 ( $i_{dopt} = optimal$ ).

그림 4는 그림 2와 3의 운전에 따른 손실을 비교하여 나타낸다. 그림 4(a)은 동손, 그림 4(b)은 철손, 그림 4(c)는 총 손실을 나타내고 있다. 그림 4에서 A는  $i_{d0}$  제어로 운전 한 경우이며, B는 효율 최적화 제어로 운전한 경우이다. 동손과 철손은 효율 최적화 제어를 하였을 경우 손실이 크게 나타나고 있다.



<그림 4>  $i_{d0}$  제어와  $i_{dopt}$ 의 전체 손실 비교.

### 4. 결론

본 논문에서는 FLC와 손실최소화 기법을 이용한 IPMSM 드라이브의 실시간 효율최적화 제어를 제시하였다. 제어가 가능한 전기적인 손실은 철손과 동손이며 이 손실은 전기자 전류의 최적화 제어에 의해 최소화시킬 수 있다. 손실 최소화 기법은 IPMSM 드라이브의 동작상태에 따른 최적의  $d$  축 전류를 결정하고 이 전류를 각 제어모드에 사용한다. 이러한 손실 최소화 기법을 통해 효율 최대화를 이룩할 수 있었으며 IPMSM에 적용하여 양호한 응답특성을 얻을 수 있었다.

### [참고 문헌]

- [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] C. Mademlis, J. Xypteras and N. Margaris, "Loss minimization in surface permanent magnet synchronous motor drives," IEEE Trans. on IE, vol. 47, no. 1, pp. 115-122, 2000.
- [3] 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.
- [4] C. Cavallaro, A. O. D. Tommaso, R. Miceli, A. Raciti, G. R. Galluzzo and M. Trapanese, "Analysis a DSP implementation and experimental validation of a loss minimization algorithm applied to permanent magnet synchronous motor drives," IECON '03. The 29th Annual Conference of the IEEE, vol. 1, pp. 312-317, 2003.
- [5] Sergaki, S. Eleftheria, Georgilakis, S. Pavlos, Kladas, G. Antonios, Stavarakis and S. George, "Fuzzy logic based online electromagnetic loss minimization of permanent magnet synchronous motor drives," 18th International Conference on ICEM 2008, pp. 1-7, 2008.