

# ALM-FNN 제어를 이용한 SynRM의 효율 최적화 제어

(Efficiency optimization control of SynRM using ALM-FNN controller)

박병상\* · 박기태 · 고재섭 · 최정식 · 정동화

(Byung-Sang Park · Ki-Tae Park · Jae-Sub Ko · Jung-Sik Choi · Dong-Hwa Chung)

## Abstract

This paper is proposed an efficiency optimization control algorithm for a synchronous reluctance motor which minimizes the copper and iron losses. The design of the speed controller based on adaptive learning mechanism-fuzzy neural networks(ALM-FNN) controller that is implemented using adaptive, fuzzy control and neural networks. The control performance of the hybrid artificial intelligent controller is evaluated by analysis for various operating conditions. Analysis results are presented to show the validity of the proposed algorithm

## 1. 서론

SynRM의 벡터제어에서 고정자 전류의  $d$ 와  $q$ 축 성분은 상호 독립적인 변수이며, 어떤 속도에 대한 특정 토크는  $d$ 와  $q$ 축 전류성분의 다양한 합성으로 얻을 수 있다.[1-5]  $d$ 와  $q$ 축 전류성분을 분해하여 특정 토크를 얻을 수 있으나 전동기의 효율은 매우 광범위하게 변화한다.  $d$ 축 전류가 크면 철손이 커지고 매우 작으면 전류 및 동손이 증가한다. 따라서 전동기의 모든 동작점에서 최적효율에 관계된 설정 토크를 구하면 이 토크에서 발생하는 최적전류를 얻을 수 있다.

본 논문에서는 ALM-FNN 제어를 이용하여 SynRM의 고성능 운전을 위하여 손실이 최소가 되는 효율 최적화 제어를 제시한다. 추정 토크는 동기 좌표계에서 전류와 전동기의 파라미터로부터 직접 계산하며 토크 제어기의 출력인  $d$ 와  $q$ 축 전류는 지령 토크를 추종한다. SynRM에서 철손 및 포화에 의해 토크의 비선형성을 해결하기 위하여 철손을 고려한 모델을 대상으로 해석한다. 철손을 고려한 모델을 이용하여 손실이 최소화되고 효율이 최적화된  $d$ 축 전류의 조건을 구한다. 제시된 알고리즘에서는 간단한 철손 보상 루틴을 첨가하여 철손 때문에 야기되는 토크의 비선형성을 보상한다. 효율 최적화 제어는 종래의  $d$ 축 전류의 일정 제어와 비교하여 손실이 최소가 고성능 제어 및 토크 성능이 양호하게 나타난다. 본 연구의 효율 최적화 제어의 타당성을 입증하고 그 결과를 제시한다.

## 2. 철손을 고려한 SynRM의 모델링

그림 1은 SynRM의 철손저항을 고려한  $d$ 와  $q$ 축의 등가회로를 나타낸다.

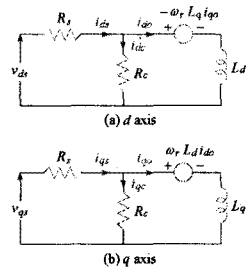


그림 1 SynRM의 등가회로  
Fig. 1 Equivalent circuit of SynRM

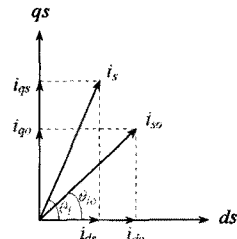


그림 2 SynRM의 전류 벡터도  
Fig. 2 Current vector diagram of SynRM

그림 2는 철손을 고려한 경우의 SynRM의 전류 벡터도를 나타낸다. 그림 1의 등가회로에서 전압방정식을 구하면 다음과 같다.

$$v_{ds} = R_s i_{ds} + L_d \frac{di_{d0}}{dt} - \omega_r L_q i_{q0} \quad (1)$$

$$v_{qs} = R_s i_{qs} + L_q \frac{di_{q0}}{dt} + \omega_r L_d i_{d0} \quad (2)$$

$$i_{ds} = i_{d0} + i_{dc} = i_{d0} + \frac{1}{R_c} (L_d \frac{d}{dt} i_{d0} - \omega_r L_q i_{q0}) \quad (3)$$

$$i_{qs} = i_{q0} + i_{qc} = i_{q0} + \frac{1}{R_c} (L_q \frac{d}{dt} i_{q0} + \omega_r L_d i_{d0}) \quad (4)$$

식(1)-(4)를 상태 미분방정식 형태로 표시하면 다음과 같다.

$$p \begin{bmatrix} i_{d0} \\ i_{q0} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\frac{R_s}{L_d(1+R_s/R_c)} & \frac{\omega_r L_q}{L_d} \\ -\omega_r \frac{L_d}{L_q} & -\frac{R_s}{L_q(1+R_s/R_c)} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{d0} \\ i_{q0} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} v_{ds} \\ v_{qs} \end{bmatrix} \quad (5)$$

발생 토크는 전류의 성분  $i_{d0}$  와  $i_{q0}$  에 비례한다.

$$T_e = \frac{3P}{2} (L_d - L_q) i_{d0} i_{q0} \quad (6)$$

### 3. ALM-FNN 제어기의 설계

SynRM 드라이브 시스템을 위한 ALM-FNN 제어기는 그림 3과 같다. FNN 제어기는 드라이브 시스템의 동작을 관측하고 요구되는 지령치로 실제 성능을 비교한다. 학습 메카니즘은 요구되는 시스템 동작으로 거의 일치시키기 위하여 FNN 제어기를 수정한다. FNN의 입력은 속도오차  $e$  및 속도오차의 변화분  $ce$  이다. FNN의 출력  $\Delta i_{qs}^*$  은 중심 비퍼지화 방법에 의해 계산한다. 이전 출력  $i_{qs}^*(k-1)$  에 출력  $\Delta i_{qs}^*(k)$  를 합하여 최종  $i_{qs}^*(k)$  를 얻고 이를 전동기의 입력으로 한다.

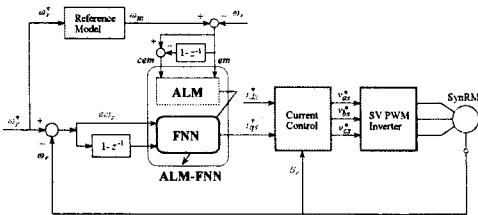


그림 3 ALM-FNN 및 ANN 제어기  
Fig. 3 ALM-FNN and ANN controller

그림 4는 적응 학습 메카니즘을 이용한 FNN 제어기의 구조를 나타낸다.

$$em(kT) = \omega_m(kT) - \hat{\omega}_r(kT) \quad (7)$$

$$cem(kT) = em(kT) - em(kT-T) \quad (8)$$

여기서 오차  $em(kT)$ 은 각 시간순시에서 얻어지는 필요한 속도성능의 측정 정도이다.

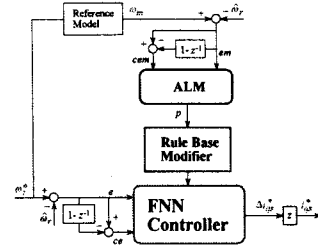


그림 4 적응 학습 메카니즘에 의한 FNN 제어기  
Fig. 4 FNN controller with adaptive learning algorithm

퍼지 역모델은 오차  $em(kT)$ 를 사상하여 프로세서의 입력  $p(kT)$ 를 변화시키며  $em(kT)$ 를 영이 되도록 강제화 시킨다. 프로세서에서 변화  $p(kT)$ 는 입력오차  $em(kT)$ 에 기초하여 퍼지 역모델에 의해서 발생한다. 지식베이스의 수정자는  $p(kT)$ 에 따라서 FNN 제어기의 지식베이스를 변화시킨다.

$$C_i(kT) = C_i(kT-T) + p(kT) \quad (9)$$

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

### 4. 효율 최적화 제어

효율 최적화를 위한 전류 위상각에서는 전기적인 정상상태만 고려하면 충분하다.

식(1)-(4)를 이용하여 철손과 동손을 구한다. 동손은 다음 식과 같다.

$$P_{cl} = \frac{3}{2} R_s i_s^2 = \frac{3}{2} R_s (i_{ds}^2 + i_{qs}^2) = \frac{3}{2} R_s \left\{ \left( i_{d0} - \frac{\omega_r L_q i_{q0}}{r_c} \right)^2 + \left( i_{q0} + \frac{\omega_r L_d i_{d0}}{r_c} \right)^2 \right\} \quad (10)$$

철손은 다음 식과 구할 수 있다.

$$P_{ll} = \frac{3}{2} \frac{(\omega_r \lambda_m)^2}{R_c} = \frac{3}{2} \left\{ \frac{(\omega_r L_q i_{q0})^2}{R_c} + \frac{(\omega_r L_d i_{d0})^2}{R_c} \right\} \quad (11)$$

따라서 전체 손실은 동손과 철손의 합으로 다음과 같다.

$$P_{total} = P_{ci} + P_{rj} = \frac{3}{2} \left\{ \left( R_s + \frac{(\omega_r L_d)^2}{R_c} + \frac{R_r}{R_c^2} (\omega_r L_d)^2 \right) i_{do}^2 + \left( R_s + \frac{(\omega_r L_q)^2}{R_c} + \frac{R_r}{R_c^2} (\omega_r L_q)^2 \right) i_{qp}^2 + \left( \frac{2R_r}{R_c} \omega_r (L_d - L_q) \right) i_{do} i_{qp} \right\} \quad (12)$$

$P_{total}$  을  $i_{do}$  항으로 표현하기 위해 식(6)을 변형하면 다음과 같다.

$$i_{qo} = \frac{T_e^*}{\frac{3P}{2} \frac{(L_d - L_q)}{2} i_{do}} = \frac{K}{i_{do}} \quad (13)$$

식(13)을 식(12)에 대입하여 정리하면 다음과 같다.

$$P_{total} = \frac{3}{2} \{ A i_{do}^2 + B i_{do}^{-2} + C \} \quad (14)$$

여기서 계수는 다음과 같이 표현된다.

$$A = R_s + \frac{(\omega_r L_d)^2}{R_c} \left( 1 + \frac{R_r}{R_c} \right)$$

$$B = K^2 \left\{ R_s + \frac{(\omega_r L_q)^2}{R_c} \left( 1 + \frac{R_r}{R_c} \right) \right\}$$

$$C = 2K \frac{R_r}{R_c} \omega_r (L_d - L_q)$$

전동기의 효율의 최적화는 전체손실  $P_{total}$  을 최소화하여 얻을 수 있다.

$P_{total}$  를  $i_{do}$  로 미분하여 영으로 놓는다.

$$\frac{dP_{total}}{di_{do}} = \frac{3}{2} \{ 2A i_{do} - 2B i_{do}^{-3} \} = 3A i_{do}^{-3} (i_{do}^4 - B/A) = 0 \quad (15)$$

$$= 3A i_{do}^{-3} (i_{do}^2 + \sqrt{B/A}) \{ i_{do} + (B/A)^{1/4} \} (i_{do} - (B/A)^{1/4}) = 0$$

전체손실  $P_{total}$  이 최소가 되는  $i_{do-min}$  을 구하면 전체손실을 최소로 하는 조건을 구할 수 있다.

$$i_{do-min} = (B/A)^{1/4} \quad (16)$$

그림 5은 SynRM을 위한 효율 최적화 제어의 구성도를 나타낸다.

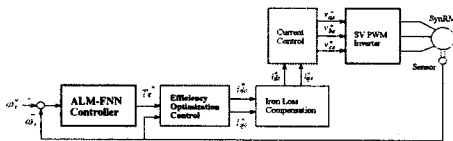


그림 5 SynRM을 위한 효율 최적화 제어  
Fig. 5 An efficiency optimization control configuration for SynRM

## 5. 시스템의 성능결과

그림 6은 0.2[s]에서 지령속도를 1800[rpm]으로 상승시키고 0.5-0.7[s]까지 부하토크를 2[N·m]로 증가할 경우에 나타나는 응답특성이다. 그림 6(a)는 지령속도와 실제속도를 나타내며 더욱 명확하게 비교하기 위하여 그림 6(b)와 (c)는 확대한 그림이다.

그림 6(b)는 초기상태이며 본 논문에서 제시한 ALM-FNN 제어가 FNN 제어기 보다 오버슈트가 작고 상승시간이 빠르며 빠르게 안정화되고 있다. 그림 6(c)는 부하토크를 증가할 경우의 응답특성이며 이 경우에도 ALM-FNN 제어기는 FNN 제어기 보다 고속 성능을 보이고 있다.

그림 7은 지령속도를 1800[rpm]과 -1800[rpm]으로 반복적으로 정·역회전 운전을 하였을 경우에 나타나는 응답특성이다. 이 경우에도 ALM-FNN 제어기가 FNN 제어기 보다 양호한 성능이 나타난다.

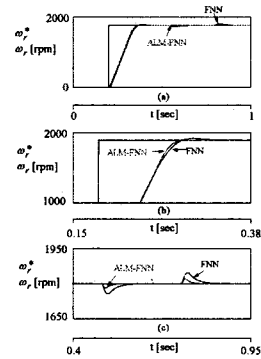


그림 6 속도와 부하토크 변동에 의한 응답특성  
Fig. 6 Response characteristics with speed and load torque change

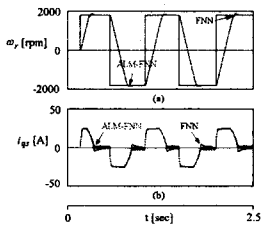


그림 7 정·역회전 운전에 대한 응답특성  
Fig. 7 Response characteristics with forward and reverse operation

그림 8은 ALM-FNN 제어기로 속도를 제어하고 4상한 운전을 하였을 경우에 나타나는 응답특성이다. 그림 8(a)는 지령속도와 실제속도, 그림 (b)는 q축 고정자 전류, (c)는 d축 고정자 전류, (d)는 발생토크 및 (e)는 a상 전류를 나타낸다.  $i_{ds}$ 가 일정하게 제어가 되고 있으며 발생토크는  $i_{qo}$ 에 의해 제어가 되고 있다.

그림 9에서는  $i_{ds}$ 는 효율 최적화 제어를 만족하는 조건으로 제어된다. 일정  $i_{ds}$  제어에서는 고정자 지령전

류  $i_{ds}^*$ ,  $i_{qs}^*$  는 토크 발생전류  $i_{do}^*$ ,  $i_{qo}^*$  를 같게 하여 철손을 보상하지만 정, 역회전 구간에서 약간의 토크의 비선형성이 나타난다. 그러나 효율 최적화 제어에서는 효율이 최적화가 되는 전류  $i_{do}^*$ ,  $i_{qo}^*$  를 계산하고 철손 보상에 의해  $i_{ds}^*$ ,  $i_{qs}^*$  를 구하기 때문에 과토크 동작에서 비선형성은 나타나지 않는다.

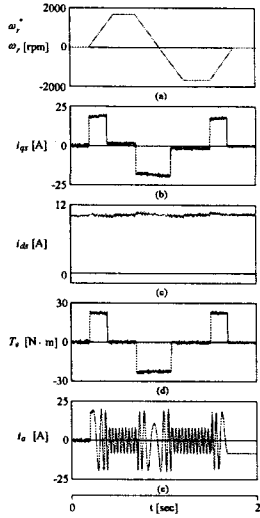


그림 8 일정  $i_{ds}$  에 대한 응답특성  
Fig. 8 The response characteristics of constant  $i_{ds}$  control

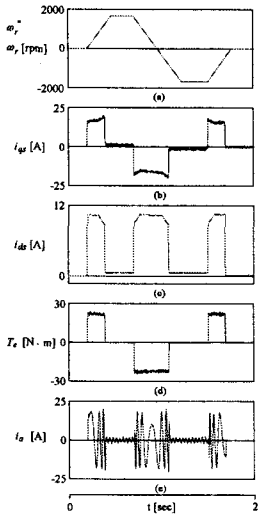


그림 9 효율 최적화 제어에 대한 응답특성  
Fig. 9 The response characteristics of efficiency optimization control

그림 10은 종래의 일정  $i_{ds}$  제어에서 손실 결과이며 그림 11은 본 논문에서 제시한 효율 최적화 제어에서 손실 결과이다. 그림 10과 11에서 (a)는 동손, (b)는 철

손 및 (c)는 전체손실을 나타낸다. 그림 12는 일정  $i_{ds}$  제어와 효율 최적화 제어에서 전체 손실을 비교하였다. 그림에서 A는 일정  $i_{ds}$  제어이며 B는 효율 최적화 제어에서 전체 손실을 나타낸다. 두 경우의 손실을 비교하면 속도가 변동하는 구간에서는 속도제어를 위하여 거의 같은 손실이 발생하지만 정상상태에서는 효율 최적화 제어는 일정  $i_{ds}$  제어보다 손실이 매우 감소된다. 손실 최소화는 효율 최대화를 이룩할 수 있다.

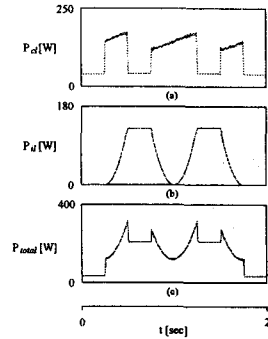


그림 10 일정  $i_{ds}$  의 손실 응답  
Fig. 10 Loss response of constant  $i_{ds}$  control

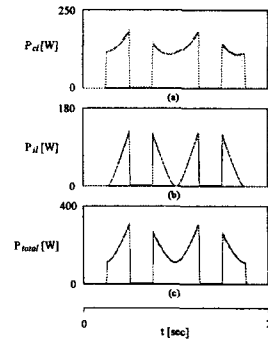


그림 11 효율 최적화 제어의 손실 응답  
Fig. 11 Loss response of efficiency optimization control

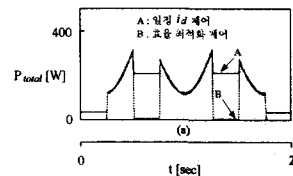


그림 12 전체 손실의 비교  
Fig. 12 Total loss comparison

그림 13은 정상상태에서 일정  $i_{ds}$  제어와 효율 최적화 제어를 할 경우 부하토크에 대한 효율의 변화를 나타낸다. 그림 13(a)는 일정  $i_{ds}$  제어의 효율을 나타내고 (b)는 효율 최적화 제어의 효율을 나타낸다. 효율 최적화 제어에서는 효율이 향상되며 특히 경부하에서 효율이

대폭적으로 증가한다. 이는 효율 최적화 제어는 정상 상태의 손실이 매우 감소되며 효율은 대폭적으로 증가한다. 따라서 본 논문에서 제시한 효율 최적화 제어의 타당성을 입증할 수 있다.

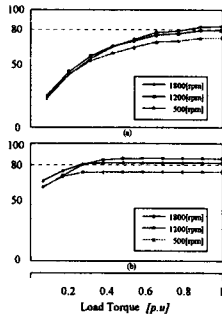


그림 13 부하 변화에 대한 효율 비교

(a) 일정  $i_{ds}$  제어 (b) 효율 최적화 제어

Fig. 13 Efficiency comparison of load variation

(a) Constant  $i_{ds}$  control

(b) Efficiency optimization control

## 6. 결 론

본 논문에서는 ALM-FNN 제어기를 이용하여 SynRM의 고성능 운전을 위하여 손실이 최소가 되는 효율 최적화 제어를 제시하였다. ALM-FNN 제어기의 성능은 FNN 제어기 보다 고성능 및 강인성 제어가 양호한 응답특성을 얻을 수 있었다. 추정 토크는 동기좌표계에서 전류와 전동기의 파라미터로부터 직접 계산하며 토크 제어기의 출력인  $d, q$  축 전류는 지령 토크를 추종한다. SynRM에서 철손 및 포화에 의해 토크의 비선형성을 해결하기 위하여 철손을 고려한 모델을 대상으로 하였다.

SynRM 드라이브의 정·역회전의 운전을 시켜 전류, 토크, 속도 및 손실의 응답특성을 구하였으며 제시된 알고리즘에서는 간단한 철손 보상 루틴을 첨가하여 철손 때문에 야기되는 토크의 비선형성을 보상하였다. 효율 최적화 제어는 종래의 일정  $d$  축 전류제어와 비교하여 대폭적으로 전체 손실이 감소되었다. 따라서 효율은 매우 증가하는 결과를 얻었으며 본 논문에서 제시한 효율 최적화의 타당성을 입증할 수 있었다.

## 참 고 문 헌

[1] T. Matsuo and T. A. Lipo, "Field oriented control of synchronous reluctance machine," in Proc. PESC, pp. 425-431, 1993.  
 [2] A. Fratta, A. Vagati and F. Villata, "Control of a reluctance synchronous motor for spindle application," in Proc. IPEC-Tokyo, pp. 708-715, 1990.

[3] R. E. Betz, et al., "Control of synchronous reluctance machines," IEEE Trans. Ind. Appl., vol. 29, no. 6, pp.1110-1121, 1993.  
 [4] L. Xu and J. Yao, "A compensated vector control scheme of a synchronous reluctance motor considering saturation and iron losses," IEEE Transaction on Industry Applications, Vol. 1A-28, no. 6, pp. 1330-1338, 1992.  
 [5] A. Vagati, T. A. Lipo, et al., "Synchronous reluctance motors and drives - A New Alternative," IEEE IAS Annu. Meet. Tutorial Course Note, 1994.