

적응 FNN 제어기를 이용한 SynRM 드라이브의 효율 최적화 제어

최정식, 이정철, 이홍균, 남수명, 고재섭, 김종관, 정동화
순천대학교 공과대학 정보통신공학부

Efficiency Optimization Control of SynRM Drive using Adative FNN Controller for

Jung-Sik Choi, Jung-Chul Lee, Hong-Gyun Lee, Su-Myeong Nam, Jae-Sub Ko, Jong-Kwan Kim, Dong-Hwa Chung
School of Information & Communication Engineering, Sunchon National Univ.

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 fuzzy-neural networks(FNN) controller that is implemented using fuzzy control and neural networks. The control performance of the adaptive FNN controller is evaluated by analysis for various operating conditions. Simulation results are presented to show the validity of the proposed algorithm

1. 서 론

SynRM의 벡터제어에서 고정자전류의 d 와 q 축 성분은 상호 독립적인 변수이며, 어떤 속도에 대한 특정 토크는 d 와 q 축의 전류성분의 다양한 합성으로 얻을 수 있다.[1-3] 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.

효율 최적화 제어기는 전동기의 실제적 구현시에 나타나는 인더턴스 포화, 철손 계수, 온도 및 고조파 영향등을 파라미터 값으로 하는 손실모델에 의해 얻을 수 있다. 어떠한 동작점에서 제어기는 효율 최적화 동작조건을 계산하고 최적치를 추적할 때까지 모델에서 하나 이상의 변수를 조절한다. 이러한 최적치는 드라이브 조절기의 지령치로 사용한다.

본 논문에서는 적응 FNN(Fuzzy Neural Network)을 이용하여 SynRM의 고성능 운전을 위하여 손실이 최소가 되는 효율 최적화 제어를 제시한다. 효율 최적화 제어는 종래의 d 축 전류의 일정제어와 비교하여 손실이 최소가 고성능 제어 및 토크 성능이 양호하게 나타나며 본 연구의 효율 최적화 제어의 타당성을 입증한다.

2. 철손을 고려한 SynRM의 모델링

그림 1은 SynRM의 철손저항을 고려한 d 와 q 축의 등가회로를 나타낸다. 철손을 고려한 R_s 는 속도전압파 병렬로 연결되어 있다. 토크를 발생하는 전류는 i_{dq} 와 i_{qs} 이며 이는 철손을 발생시키기 때문에 단자전류 i_d 와 i_q 와는 다르다.

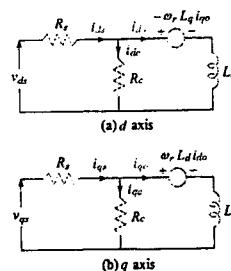


그림 1 SynRM의 등가회로

그림 1의 등가회로를 이용하여 상태 미분방정식 형태로 표시하면 다음과 같다.

$$\begin{bmatrix} \dot{i}_{d0} \\ \dot{i}_{q0} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -R_d \\ L_d(1+R_d/R_s) \\ -\omega_r \\ -R_q \\ L_q(1+R_q/R_s) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{d0} \\ i_{q0} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \frac{1}{L_d(1+R_d/R_s)} & 0 \\ 0 & \frac{1}{L_q(1+R_q/R_s)} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} v_d \\ v_{qs} \end{bmatrix} \quad (1)$$

발생 토크는 전류의 성분 i_{dq} 와 i_{qs} 에 비례한다.

$$T_e = \frac{3}{2} \frac{P}{2} (L_d - L_q) i_{dq} i_{qs} \quad (2)$$

3. 적응 FNN 제어기의 설계

SynRM 드라이브는 과도 특성에서 다양한 속도 추정 능력, 부하 및 관성 등 파라미터의 변동에도 고성능 및 강인성이 요구된다. 적응 FNN 제어기는 FNN 제어기의 기준 모델을 설계하여 퍼지추론으로 구현할 수 있는 적응 메카니즘으로 구성한다.

그림 2는 FNN 제어기를 설계하고, 적응 퍼지제어기인 AFC(Adaptive Fuzzy Controller)[4]를 병렬로 연결한다.

FNN 알고리즘에 의한 출력은 $\Delta i_{qs1}^*(k)$ 이며 AFC에 의한 출력은 $\Delta i_{qs2}^*(k)$ 이다. 이 두 출력을 합하여 적분기를 통해 지령 q 축 전류를 얻는다.

$$i_{qs}^*(k) = i_{qs}^*(k-1) + [\Delta i_{qs1}^*(k) + \Delta i_{qs2}^*(k)] \quad (3)$$

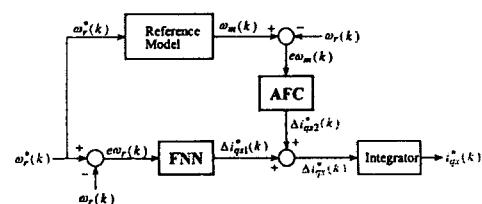


그림 2 제시한 적응 FNN 제어기의 알고리즘

4. 효율 최적화 제어

SynRM은 자속은 전류에 직접 비례하므로 효율 최적화를 위하여 자속을 조절한다. 자속을 조절할 경우에도 토크의 동특성은 그대로 유지할 수가 있다. 동순만 고려한다면 효율 최적화를 위한 전류 위상각은 45° 로 하여 $d-q$ 축 전류를 동일하게 인가한다. 그러나 실제로 동순과 함께 철손이 발생하고 있으므로 동순과 철손을 고려한 전류 위상각을 구한다. 효율 최적화를 위한 전류 위상각에서는 전기적인 정상상태만 고려하면 충분하다.

그림 1의 등가회로를 이용한 전체손실은 동 손과 철 손의 합으로 다음과 같다.

$$P_{total} = P_d + P_h = \frac{3}{2} \left[\left(R_s + \frac{(\omega_r L_d)^2}{R_c} \right) i_{do}^2 + \frac{R_s}{R_c^2} (\omega_r L_d)^2 i_{qo}^2 \right] + \left[R_s + \frac{(\omega_r L_q)^2}{R_c} + \frac{R_s}{R_c^2} (\omega_r L_q)^2 \right] i_{qo}^2 + \left\{ \frac{2R_s}{R_c} \omega_r (L_d - L_q) i_{do} i_{qo} \right\} \quad (4)$$

P_{total} 을 i_{do} 항으로 표현하기 위해 식(2)를 변형하면 다음과 같다.

$$i_{qo} = \frac{T_e^*}{\frac{3}{2} P_s (L_d - L_q) i_{do}} = \frac{K}{i_{do}} \quad (5)$$

식(5)를 식(4)에 대입하여 정리하면 다음과 같다.

$$P_{total} = \frac{3}{2} \{ A i_{do}^2 + B i_{do}^{-2} + C \} \quad (6)$$

여기서 계수는 다음과 같이 표현된다.

$$A = R_s + \frac{(\omega_r L_d)^2}{R_c} (1 + \frac{R_s}{R_c}), \quad B = K^2 \{ R_s + \frac{(\omega_r L_q)^2}{R_c} (1 + \frac{R_s}{R_c}) \}, \quad C = 2K \frac{R_s}{R_c} \omega_r (L_d - L_q)$$

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

P_{total} 을 i_{do} 로 미분하여 영으로 놓는다.

$$\frac{dP_{total}}{di_{do}} = \frac{3}{2} \{ 2A i_{do} - 2B i_{do}^{-3} \} = 3A i_{do}^{-3} \{ i_{do}^4 - B/A \} = 3A i_{do}^{-3} \{ i_{do}^2 + \sqrt{B/A} \} \{ i_{do} - (B/A)^{1/4} \} = 0 \quad (7)$$

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

$$i_{do-min} = (B/A)^{1/4} \quad (8)$$

그림 3은 SynRM을 위한 효율 최적화 제어의 구성도를 나타낸다. 지령속도와 실제속도를 비교한 다음 속도제어기에서 지령토크를 구한다. 속도제어기는 적응 FNN 제어기를 사용하였으며 지령토크와 실제속도를 이용하여 효율 최적화 제어 알고리즘을 수행한다. 지령 d, q 축 전류를 구하고 철손을 보상한 다음 i_{ds}^* 와 i_{qs}^* 를 구하여 전류 제어기와 SV PWM 인버터를 통하여 SynRM을 제어한다.

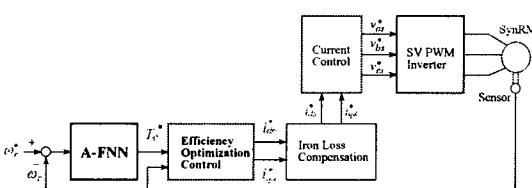


그림 3 SynRM을 위한 효율 최적화 제어

5. 시스템의 성능결과

그림 4는 i_{ds} 의 변화에 대하여 i_s , i_{qs} 및 P_{total} 의 변화를 나타낸다. 그림 4(a)는 i_{ds} 의 변화에 따라서 i_s 의 최소점이 나타나며 최소 전류조건으로 주어지는 동작점이 존재한다. 그림 4(b)는 i_{ds} 의 변화에 따라 전체 손실이 최소인 점이 나타나고 있다. 따라서 전체 손실이 최소가 되는 점을 찾아 운전을 하면 효율은 최대가 된다. 효율 최적화 제어는 손실이 최소가 나타나는 점을 최적제어로 추적하여 그 동작점에서 운전을 시킨다.

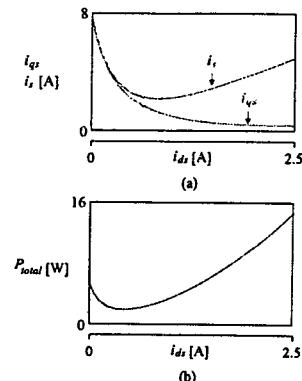


그림 4 i_{ds} 에 대한 i_s , i_{qs} 및 P_{total} 변화

그림 5는 0.2[s]에서 지령속도를 1800[rpm]으로 상승시키고 0.5-0.7[s]까지 부하토크를 2[N·m]로 인가할 경우에 나타나는 응답특성이다. 그림 5(a)는 지령속도와 실제속도를 나타내며 더욱 명확하게 비교하기 위하여 그림 5(b)와 (c)는 확대한 그림이다.

그림 5(b)는 초기상태이며 본 논문에서 제시한 A-FNN 제어기가 FNN 제어기 보다 오버슈트가 작고 상승시간이 빠르며 빠르게 안정화되고 있다. 그림 5(c)는 부하토크를 인가할 경우의 응답특성이며 이 경우에도 A-FNN 제어기는 FNN 제어기 보다 고속 성능을 보이고 있다.

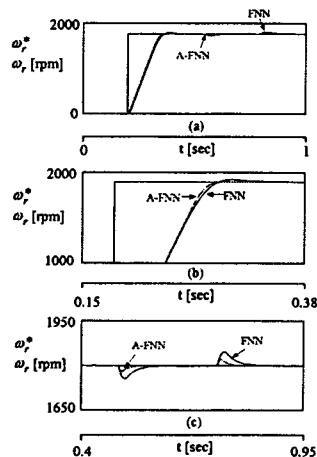


그림 5 속도와 부하토크 변동에 의한 응답특성

그림 6은 A-FNN제어기로 속도를 제어하고 4상한 운전을 하였을 경우에 나타나는 응답특성이다. 그림 6(a)는 지령속도와 실제속도, 그림 (b)는 q 축 고정자 전류, (c)는 d 축 고정자 전류를 나타낸다. i_{ds} 가 일정하게 제어가 되고 있으며 발생토크는 i_{qs} 에 의해 제어가 되고 있다.

그림 7에서는 i_{ds} 는 효율 최적화 제어를 만족하는 조건으로 제어된다. 일정 i_{ds} 제어에서는 고정자 지령전류 i_{d*}, i_{q*} 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 과도토크 동작에서 비선형성은 나타나지 않는다.

그림 8은 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 속도 제어를 위하여 거의 같은 손실이 발생하지만 정상상태에서는 효율 최적화 제어는 일정 i_{ds} 제어보다 손실이 매우 감소된다. 손실 최소화는 효율 최대화를 이룩할 수 있다.

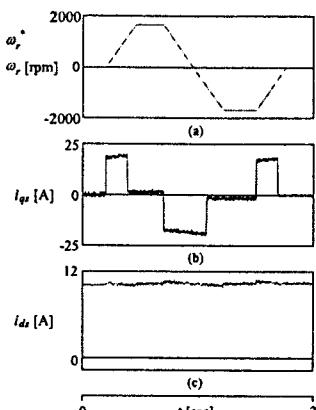


그림 6 일정 i_{ds} 에 대한 응답특성

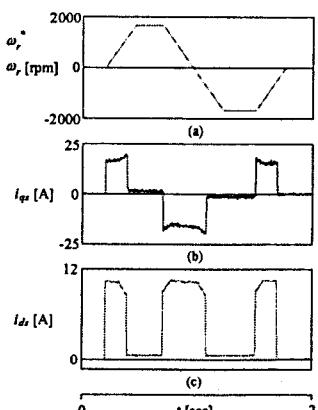


그림 7 효율 최적화 제어에 대한 응답특성

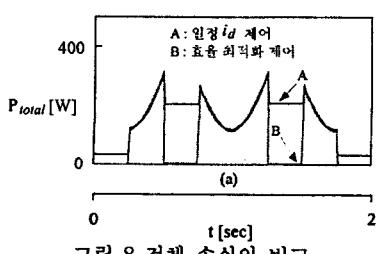


그림 8 전체 손실의 비교

그림 9는 정상상태에서 일정 i_{ds} 제어와 효율 최적화 제어할 경우 부하토크에 대한 효율의 변화를 나타낸다. 그림 9(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 정상상태의 손실이 매우 감소되어 효율은 대폭적으로 증가한다. 따라서 본 논문에서 제시한 효율 최적화 제어의 타당성을 입증할 수 있다.

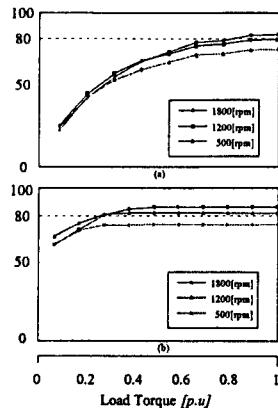


그림 9 부하 변화에 대한 효율 비교
(a) 일정 i_{ds} 제어 (b) 효율 최적화 제어

6. 결 론

본 논문에서는 SynRM에서 철손 및 포화에 의해 토크의 비선형성을 해결하기 위하여 철손을 고려한 모델을 대상으로 하였으며 적응 FNN 제어기를 이용하여 SynRM의 고성능 운전을 위하여 손실이 최소가 되는 효율 최적화 제어를 제시하였다. 적응 FNN 제어기의 성능은 FNN 제어기 보다 고성능 및 간인성 제어가 양호한 응답특성을 얻을 수 있었다.

SynRM 드라이브의 4상한 운전을 시켜 전류, 토크, 속도 및 손실의 응답특성을 구하였으며 제시된 알고리즘에서는 간단한 철손 보상 루틴을 추가하여 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] A. Fratta, A. Vagati and F. Villata, "Control of a reluctance synchronous motor for spindle application," in Proc. IPEC-Tokyo, pp. 708-715, 1990.
- [2] R. E. Betz, et al., "Control of synchronous reluctance machines," IEEE Trans. Ind. Appl., vol. 29, no. 6, pp.1110-1121, 1993.
- [3] A. Vagati, T. A. Lipo, et al., "Synchronous reluctance motors and drives - A New Alternative," IEEE IAS Annu. Meet. Tutorial Course Note, 1994.
- [4] J. E. Fletcher, B. W. Williams and T. C. Green, "Loss reduction in a synchronous reluctance drive system using DSP control," IEEE IAS Annu. Meet., pp. 402-407, 1995.

본 결과물은 교육인적자원부와 산업자원부의 출연금 및 보조금으로 수행한 산학협력중심대학육성사업의 연구결과입니다.