

ANN 센서리스 제어에 의한 SynRM의 효율 최적화 제어

Efficiency Optimization Control of SynRM with ANN Sensorless

최정식*, 고재섭*, 남수명*, 정동화**

Jung-Sik Choi*, Jae-Sub Ko*, Su-Myung Nam*, Dong-Hwa Chung**

Abstract - This paper is proposed an efficiency optimization control algorithm for a synchronous reluctance motor(SynRM) which minimizes the copper and iron losses. Also, this paper presents a sensorless control scheme of SynRM using artificial neural network(ANN).

The proposed algorithm allows the electromagnetic losses in variable speed and torque drives to be reduced while keeping good torque control dynamics. The control performance of ANN is evaluated by analysis for various operating conditions. Analysis results are presented to show the validity of the proposed algorithm

Key Words : Synchronous Reluctance Motor, efficiency optimization control, Artificial Neural Network, Sensorless Control.

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]

효율 최적화 제어기는 어떠한 동작점에서 효율 최적화 동작 조건을 계산하고 최적치를 추적할 때까지 모델에서 하나 이상의 변수를 조절한다. 이러한 최적치는 드라이브 조절기의 지령치로 사용한다. 이러한 연구의 유용성은 정확한 손실모델에 의존하여 얻을 수 있다. SynRM 드라이브를 위한 위치 및 속도 센서리스 벡터제어의 연구가 다양하게 이루어지고 있다.[4]-[5] 센서리스 벡터제어 시스템은 권선에서 유도된 전압[4] 또는 전류 파형에서 인버터의 스위칭 리플을 이용하여[5] 회전자의 위치와 속도를 추종하는 기법들이 제시되었다.

본 논문에서는 ANN(Artificial Neural Network)에 의한 SynRM의 손실이 최소가 되는 효율 최적화 제어를 제시한다.

제시된 알고리즘에서는 간단한 철손 보상 루틴을 첨가하여 철손 때문에 야기되는 토크의 비선형성을 보상한다. 효율 최적화 제어는 종래의 d 축 전류의 일정제어와 비교하여 손실이 최소가 되고 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. 철손을 고려한 R_c 는 속도전압과 병렬로 연결되

어 있다. 토크를 발생시키는 전류는 i_{d0} 와 i_{q0} 이며 이는 철손을 발생시키기 때문에 단자전류 i_{ds} 와 i_{qs} 와는 다르다.

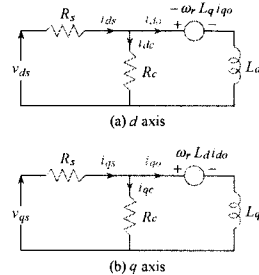


그림 1 SynRM의 등가회로

그림 1의 등가회로에서 전압방정식을 구하여 상태 미분방정식 형태로 표시하면 다음과 같다.

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

발생 토크는 전류의 성분 i_{d0} 와 i_{q0} 에 비례한다.

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

3. ANN에 의한 속도추정

ANN은 인간 두뇌의 간단한 모델에 의해 사고하는 구조로 된 컴퓨팅 시스템이다. ANN은 비선형 동적 시스템의 파라미터를 추정 및 제어를 하는데 사용된다. ANN을 이용한 시스템의 추정에서 구한 최종 추정속도는 다음 식과 같다.

저자 소개

* 順天大學 電氣工學科 碩士課程

** 順天大學 電氣工學科 教授 · 工博

$$\begin{aligned}\hat{\omega}_r(k+1) &= \hat{\omega}_r(k) + \Delta\hat{\omega}_r(k) \\ &= \hat{\omega}_r(k) - \frac{\Delta W_2(k)}{T} \\ &= \hat{\omega}_r(k) - \frac{\eta}{T} \left\{ [i_{qm}(k) - \hat{i}_{qm}(k)] \hat{i}_{dm}(k-1) \right. \\ &\quad \left. - c[i_{dm}(k) - \hat{i}_{dm}(k)] \hat{i}_{qm}(k-1) \right\} - \frac{\alpha}{T} \Delta W_2(k-1)\end{aligned}\quad (3)$$

여기서 T 는 샘플링 주기를 나타내며 η 는 학습계수이며 학습과정에서 학습율을 나타낸다. 이 계수가 크면 하중 변화가 크다. 실제 구현을 위하여 학습율은 진동이 유발되지 않는 범위에서 큰 값으로 선정한다. 계수 α 는 현재 하중에서 변동하는 과거 하중의 영향을 결정한다.

추진속도를 이용하여 회전자 자극의 위치는 다음과 같다.

4. 효율 최적화 제어

SynRM은 동손만 고려한다면 효율 최적화를 위한 전류 위상각은 45° 로 하여 $d-q$ 축 전류를 동일하게 인가한다. 그러나 실제로 동손과 함께 철손이 발생하고 있으므로 동손과 철손을 고려한 전류 위상각을 구한다. 효율 최적화를 위한 전류 위상각에서는 전기적인 정상상태만 고려하면 충분하다.

전압방정식을 이용해 동손과 철손의 합인 전체손실은 다음 식으로 나타낼 수 있다.

$$\begin{aligned}P_{total} &= P_{cl} + P_{ll} = \frac{3}{2} \left\{ R_s + \frac{(\omega_r L_d)^2}{R_c} + \frac{R_r}{R_c} (\omega_r L_d)^2 \right\} i_{do}^2 \\ &\quad + \left\{ R_s + \frac{(\omega_r L_q)^2}{R_c} + \frac{R_r}{R_c} (\omega_r L_q)^2 \right\} i_{qo}^2 + \left\{ \frac{2R_s}{R_c} \omega_r (L_d - L_q) \right\} i_{do} i_{qo}\end{aligned}\quad (4)$$

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

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

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.

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

전동기의 효율의 최적화는 전체손실 P_{total} 을 i_{do} 로 미분하여 P_{total} 를 최소화하여 얻을 수 있다.

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

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 2는 SynRM을 위한 효율 최적화 제어의 구성도를 나타낸다. 지령속도와 실제속도를 비교한 다음 속도제어기에서 지령토크를 구한다. 지령토크와 실제속도를 이용하여 효율 최적화 제어 알고리즘을 수행한다. 지령 d, q 축 전류를 구하고 철손을 보상한 다음 i_{do}^* 와 i_{qo}^* 를 구하여 전류 제어기와 SV PWM 인버터를 통하여 SynRM을 제어한다.

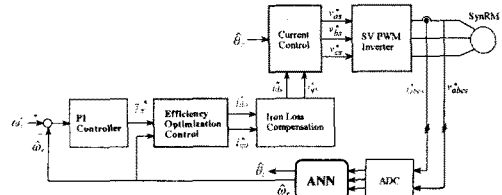


그림 2 SynRM을 위한 효율 최적화 제어

5. 시스템의 성능결과

그림 3은 본 논문에서 제시한 센서리스 벡터제어를 이용하여 부하토크 0.5[pu]의 조건에서 0.2초 후에 스텝 지령속도 200[rpm]으로 추정하는 응답특성을 나타낸다. 저속의 경우에서 추종 속도는 실제속도에 양호하게 추종되고 있다. 그림 4는 제시한 센서리스 벡터제어이며 부하토크 1.0[pu] 조건에서 0.2초 후에 스텝 지령속도 1800[rpm]으로 추정하는 응답특성을 나타낸다. 고속의 경우에도 추종속도는 지령속도 및 실제속도에 양호하게 추종되고 있다.

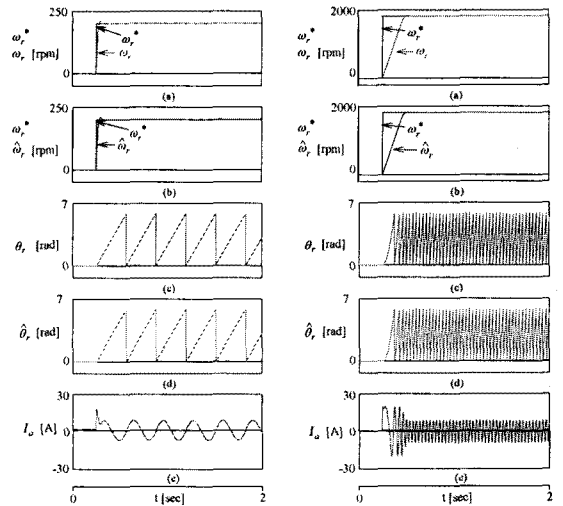


그림 3 스텝 지령속도에 의한 응답특성(저속) 그림 4 스텝 지령속도에 의한 응답특성(고속)

전 속도 영역에서 추정 성능은 폐루프의 위치제어로서 가능하다. 그림 5와 6은 부하토크를 각각 0.5[pu] 및 1.0[pu]의 조건에서 위치제어기에 의한 응답특성을 나타낸

다. 그림 5는 지령위치는 0.2초에서 $3\pi[\text{rad}]$ 로 운전하다가 1초에서 $-3\pi[\text{rad}]$ 로 운전했을 경우이며 그림 5(a)는 지령 위치, 실제위치 및 추정위치를 나타낸다. 그림 5(b)는 실제속도와 추정속도를 나타내고 그림 5(c)는 실제각과 추정각을 나타내며 그림 5(d)는 q 축 전류를 나타낸다. 추정위치는 실제위치에 양호하게 추정되고 있으며 추정속도도 실제속도에 매우 양호하게 추정되고 있다. 그리고 추정각도 실제각에 양호하게 추정되고 있다. 그림 6은 지령위치가 0.2초에서 $20\pi[\text{rad}]$ 로 운전하다가 1.5초에서 $-20\pi[\text{rad}]$ 운전했을 경우이며 고속의 경우에도 추정위치는 실제위치에 양호하게 추정되고 있으며 추정속도도 실제속도에 매우 양호하게 추정되고 있다. 그리고 추정각은 실제각에 양호하게 추정되고 있다.

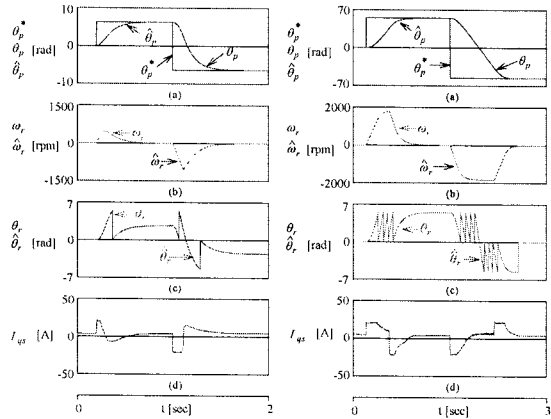


그림 5 위치제어의 응답특성(3πrad → -3πrad) 그림 6 위치제어의 응답특성 (20πrad → -20πrad)

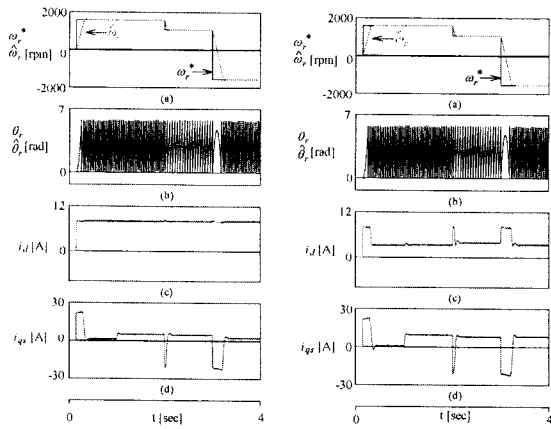


그림 7 속도 및 부하변화에 의한 일정 d축 전류 제어의 응답특성 그림 8 속도 및 부하변화에 의한 효율 최적화 제어의 응답특성

그림 7은 지령속도는 1800[rpm]이며 무부하로 정상운전 후, $t=1[\text{sec}]$ 에서 $T_L = 5[\text{N}\cdot\text{m}]$ 의 부하를 인가하고 $t=2[\text{sec}]$ 에서 지령속도를 1200[rpm]으로 감속한 다음, $t=3[\text{sec}]$ 에서 $-1800[\text{rpm}]$ 으로 운전 할 경우의 응답특성을 나타낸다. 종래의 d 축 전류의 일정 제어방식을 사용하였다. 추정속도와 추정 회전각은 실제속도와 실제 회전각에 양호하게 추종하며 d 축 전류는 일정하게 나타나고 있다.

그림 8은 그림 7과 같은 조건에서 운전하며 본 논문에서 제시한 효율 최적화 제어의 응답특성을 나타낸다. 추정속도와 추정 회전각은 실제속도와 실제 회전각에 양호하게 추종하며 d 축 전류는 효율을 최적화하는 방향으로 나타난다.

그림 9는 전체 손실을 비교한 결과이며 본 논문에서 제시한 효율 최적화 제어가 종래의 일정 d 축 전류 제어방식보다 정상상태에서는 손실이 대폭 감소된다.

따라서 본 논문에서 제시한 효율 최적화 제어의 타당성을 입증할 수 있다.

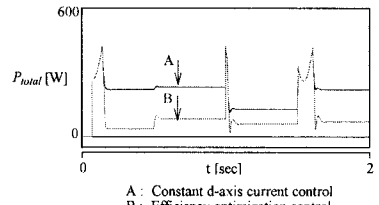


그림 9 일정 d축 전류제어와 효율 최적화 제어의 전체 손실비교

6. 결 론

본 논문에서는 유도전동기와 경쟁할 수 있는 강인하며 저렴하고 모든 속도와 부하변화에 적용 가능한 SynRM 드라이브를 구현하기 위하여 위치 및 속도 검출기 없는 센서리스 벡터 제어 알고리즘을 제시하였다. 센서리스 벡터제어의 알고리즘을 사용하여 철손과 동손을 최소화한 효율 최적화 제어를 제시하였으며 본 논문에서는 다음과 같은 결과를 얻었다.

- (1) 저속과 고속의 스텝 지령속도에 의한 추정속도 및 위치는 실제속도 및 위치에 양호하게 추정하였다.
 - (2) 저속과 고속의 스텝 지령위치에서 위치제어의 응답특성은 양호하였다.
 - (3) 속도와 부하변동에 의한 효율 최적화 제어의 응답은 우수하게 나타났다.
 - (4) 효율 최적화 제어는 종래의 일정 d 축 전류제어에 비해 손실이 대폭적으로 감소하였다.
- 따라서 본 논문의 센서리스 벡터제어 및 효율 최적화 제어의 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] 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.
- [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] M. S. Arefeen, M. Ehsani and T. A. Lipo, "An analysis of the accuracy of indirect shaft sensor for synchronous reluctance motor," IEEE Trans. on IA, vol. 30, no. 5, pp. 1202-1209, 1994.
- [5] M. G. Jovanovic, R. E. Betz and D. Platt, "Sensorless vector controller for a synchronous reluctance motor," IEEE IAS Ann. Meet., pp. 122-129, 1996.