

동기릴럭턴스전동기의 전류센서리스 최대토크제어

(Current Sensorless Maximum Torque Control of a Synchronous Reluctance Motor)

신명호*

(Myoung-Ho Shin)

Abstract

This paper presents a current sensorless maximum torque control of a synchronous reluctance motor drive. Stator current and current angle vs. maximum torque are obtained using measured d-axis and q-axis inductances. Then, d and q-axis stator voltage references for current sensorless maximum torque control are calculated from stator voltage equations. The proposed method is verified by simulation results comparing with conventional method.

Key Words : Synchronous Reluctance Motor, Maximum Torque, Magnetic Saturation, Current Sensorless

1. 서 론

동기릴럭턴스전동기는 구조가 간단하고, 튼튼하며, 효율이 높고, 고속운전이 가능하다는 장점 등으로 많은 연구가 이루어지고 있다[1-12].

동기릴럭턴스전동기의 제어에서 최대토크제어는 손실을 최소화하여 효율을 증가시키는 장점이 있는데, 자기회로의 포화에 의한 d축 인덕턴스 및 q축 인덕턴스의 변화를 고려한 최대토크제어에 관한 연구가 이루어졌다[1-4].

동기릴럭턴스전동기의 벡터제어시 d축 및 q축 전류의 제어를 위하여 전류센서를 사용하여 전류를 검출

하는데, 전류센서의 사용은 가격을 상승시키고, 노이즈에 취약하며, 내환경성 측면에서 불리한 단점을 가지고 있으므로 전류센서를 사용하지 않는 제어에 관한 연구가 이루어졌다[5-11]. [5]에서 저자는 d축 및 q축 인덕턴스를 일정한 값으로 가정하였으며 d축 전류 및 q축 전류가 같을 때 최대토크가 발생한다는 조건으로 d축 및 q축 전압지령치를 계산하여 전류센서리스제어를 구현하였다. 그러나 [1-4]에서 제시한 자기포화에 의한 d축 및 q축 인덕턴스의 변화를 고려하지 못한 문제점이 존재한다.

전류센서리스제어의 제어성능을 향상시키기 위한 연구[6-10]가 이루어졌는데, d축 및 q축 인덕턴스를 일정한 값으로 한 문제가 여전히 존재하며, 자기포화에 의한 인덕턴스 변화를 고려하여 최대토크제어를 구현한 전류센서리스제어에 관한 연구는 이루어지지 못하였다.

본 논문에서는 자기포화에 의한 인덕턴스의 변화를 고려한 전류센서리스 최대토크제어를 제안한

* Main author : Dept. of Electrical and Information Engineering, Seoul Nat'l Univ. of Science and Technology

Tel : 02-970-6408, Fax : 02-978-2754

E-mail : mhshin@seoultech.ac.kr

Received : 2015. 7. 22

Accepted : 2015. 8. 31

다. 시간에 따른 인덕턴스의 미분항이 포함된 전압 방정식으로부터 d축 및 q축 전압의 지령치를 계산 하는데, 최대토크를 발생시키기 위한 d축 및 q축 전류의 지령치는 [4]에서 제안한 방법에 의하여 계산한다. 인덕턴스를 일정한 값으로 하여 제어한 기존의 전류센서리스제어 방법과 인덕턴스의 변화를 고려한 제안한 방법의 제어결과를 비교하여 제안한 방법의 타당성을 입증한다. 또한 시간에 따른 인덕턴스의 미분항의 유무에 따른 제어성능의 차이의 제시를 통하여 인덕턴스의 시간미분항의 효과를 살펴본다.

2. 동기궤력턴스전동기 모델

동기궤력턴스전동기의 전압, 자속 및 토크는 다음과 같다[4].

$$v_d = r_s i_d + \frac{d\lambda_d}{dt} - \omega_r \lambda_q \quad (1)$$

$$v_q = r_s i_q + \frac{d\lambda_q}{dt} + \omega_r \lambda_d \quad (2)$$

$$\lambda_d = L_d i_d \quad (3)$$

$$\lambda_q = L_q i_q \quad (4)$$

$$T_e = \frac{3}{4} P (L_d - L_q) i_d i_q \quad (5)$$

여기서 r_s 는 고정자저항, ω_r 는 회전자의 전기각속도, λ_d, λ_q 는 d축 및 q축 고정자자속, L_d, L_q 는 d축 및 q축 고정자인덕턴스, i_d, i_q 는 d축 및 q축 고정자전류, P 는 극수이다.

고정자전류 i_s 및 전류각 ϕ 는 i_d 및 i_q 로부터 각각 다음과 같이 표현된다.

$$i_s = \sqrt{i_d^2 + i_q^2} \quad (6)$$

$$\phi = \tan^{-1}\left(\frac{i_q}{i_d}\right) \quad (7)$$

Table 1. Synchronous Reluctance motor parameters

Rated speed	1,000rpm
Stator resistance	0.111Ω/phase
Number of poles	6
Rated torque	60N.m
Rated current	49A

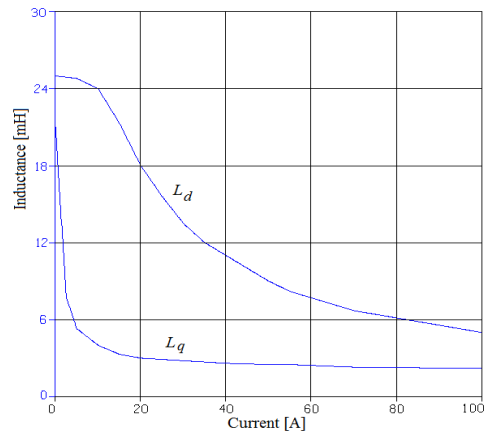


Fig. 1. L_d and L_q vs. current

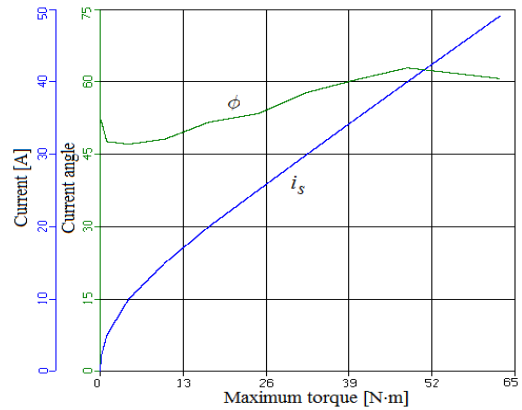


Fig. 2. Stator current and current angle vs. maximum torque

표 1은 본 논문에서 사용한 동기궤력턴스전동기의 파라미터를 나타내고 있으며[3], 그림 1은 전류변화에 따른 L_d 및 L_q 를 나타내고 있고[3], 그림 2는 최대토크에 대응하는 고정자전류 i_s 및 전류각 ϕ 를 나타내고 있는데, 최대토크에 대응하는 i_s 및 ϕ 는 [4]에서 제안한 방법에 의하여 구한다.

3. 기존방법[5]

식 (5)에서 L_d 및 L_q 가 일정할 때 최대토크는 i_d 와 i_q 가 같을 때 발생하게 된다. 그러나 부하 증가시 λ_d 가 정격자속을 초과하면 자기회로가 포화되므로 i_d 가 정격자속에 대응하는 값 i_{dmax} 를 초과하게 되면 i_d 는 i_{dmax} 로 일정하게 유지하면서 i_q 만 증가시킨다. i_q 가 i_{dmax} 보다 작을 때 $i_d=i_q$ 의 조건에서 최대토크가 발생하므로 식 (5)로부터 i_d 와 i_q 는 식 (8) 및 (9)와 같이 나타낼 수 있다.

$$i_d = \sqrt{\frac{T_e}{\frac{3}{2} \frac{P}{2} (L_d - L_q)}} \quad (8)$$

$$i_q = \pm \sqrt{\frac{T_e}{\frac{3}{2} \frac{P}{2} (L_d - L_q)}} \quad (9)$$

식 (8)과 (9)를 식 (1)과 (2)에 대입하여 정리하면 d축 및 q축 전압은 각각 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$v_d = \sqrt{\frac{1}{\frac{3}{2} \frac{P}{2} (L_d - L_q)}} \times (r_s \sqrt{T_e} + L_d \frac{d\sqrt{T_e}}{dt} \mp L_q \omega_r \sqrt{T_e}) \quad (10)$$

$$v_q = \sqrt{\frac{1}{\frac{3}{2} \frac{P}{2} (L_d - L_q)}} \times (\pm r_s \sqrt{T_e} + L_q \frac{\pm d\sqrt{T_e}}{dt} + L_d \omega_r \sqrt{T_e}) \quad (11)$$

여기서 + 부호는 $T_e > 0$ 일 때, - 부호는 $T_e < 0$ 일 때를 나타낸다. i_q 가 i_{dmax} 보다 클 때 i_q 는 식 (12)와 같으며, 식 (12)를 식 (1)과 (2)에 대입하여 정리하면 식 (13), (14)를 얻는다. 식 (15)의 T_{dq} 는 i_d 및 i_q 가 모두 i_{dmax} 일 때의 토크를 나타낸다.

$$i_q = \frac{T_e}{\frac{3}{2} \frac{P}{2} (L_d - L_q) i_{dmax}} \quad (12)$$

$$v_d = r_s i_{dmax} - \frac{L_q}{\frac{3}{2} \frac{P}{2} (L_d - L_q) i_{dmax}} \omega_r T_e \quad (13)$$

$$v_q = \frac{1}{\frac{3}{2} \frac{P}{2} (L_d - L_q) i_{dmax} + \omega_r L_d i_{dmax}} (r_s T_e + L_q \frac{dT_e}{dt}) \quad (14)$$

$$T_{dq} = \frac{3}{2} \frac{P}{2} (L_d - L_q) i_{dmax}^2 \quad (15)$$

속도제어기의 출력인 토크지령치가 T_{dq} 보다 작으면 식 (10), (11)의 전압이 d축 및 q축 지령전압이 되며, 토크지령치가 T_{dq} 보다 크면 식 (13) 및 (14)의 전압이 지령전압이 된다.

4. 제안한 방법

식 (3), (4)의 λ_d , λ_q 를 각각 식 (1), (2)에 대입하여 정리하면 다음의 식을 얻는다.

$$\begin{aligned} v_d &= r_s i_d + \frac{d(L_d i_d)}{dt} - \omega_r L_q i_q \\ &= r_s i_d + i_d \frac{dL_d}{dt} + L_d \frac{di_d}{dt} - \omega_r L_q i_q \end{aligned} \quad (16)$$

$$\begin{aligned} v_q &= r_s i_q + \frac{d(L_q i_q)}{dt} + \omega_r L_d i_d \\ &= r_s i_q + i_q \frac{dL_q}{dt} + L_q \frac{di_q}{dt} + \omega_r L_d i_d \end{aligned} \quad (17)$$

그림 1에서와 같이 인덕턴스 L_d , L_q 는 일정한 값이 아니라 전류의 함수이므로 식 (16), (17)에서 인덕턴스의 시간에 대한 미분항이 존재함을 알 수 있다.

그림 3은 제안한 전류센서리스 최대토크제어의 블록도를 나타내고 있다. ω_m 은 회전자의 기계각속도를 나타낸다. 속도제어기의 출력은 토크지령치 T_e^* 이며, 그림 2에서 T_e^* 에 대응하는 전류각 ϕ^* 및 고정자전류 i_s^* 를 구한 후 d축 및 q축 전류의 지령치 i_d^* 및 i_q^* 를 계산한다. 그리고, i_d^* 및 i_q^* 에 대응하는 인덕턴스 L_d , L_q 를 그림 1에서 구한 후 식 (16), (17)을 이용하여 d축

및 q축 전압지령치 v_d^* 및 v_q^* 를 구한다.

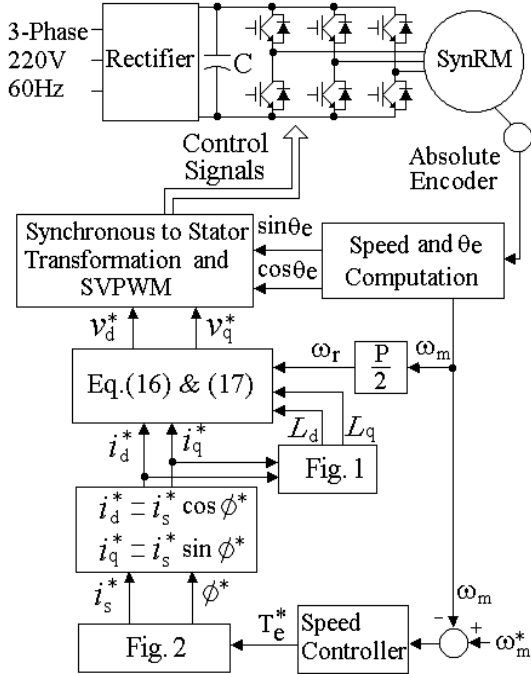


Fig. 3. Proposed block diagram of current sensorless maximum torque control

5. 시뮬레이션 결과

표 1의 동기릴렉턴스전동기를 ACSL (Advanced Continuous Simulation Language)를 사용하여 시뮬레이션을 수행하였다. 전류제어주기는 $T_c=100\mu\text{sec}$, 속도제어주기는 1msec이며, dc link 전압은 325V이다. 식 (16)의 미분항은 식 (18), (19)에 의해서 구하며, 식 (17)의 미분항도 같은 방법으로 계산한다. 인버터는 Space Vector PWM 방식이다.

$$\frac{dL_d}{dt} = \frac{L_d(k) - L_d(k-1)}{T_c} \quad (18)$$

$$\frac{di_d}{dt} = \frac{i_d(k) - i_d(k-1)}{T_c} \quad (19)$$

그림 4는 제안한 방법에 의한 시뮬레이션결과이다. 부하는 30N.m이며, 속도지령은 2.5s에 500rpm에서 1,000rpm으로 변경된다. L_d 및 L_q 는 전동기의 인덕턴

스를 나타낸다. 속도제어가 원활히 잘 되고 있는 모습을 나타내고 있다.

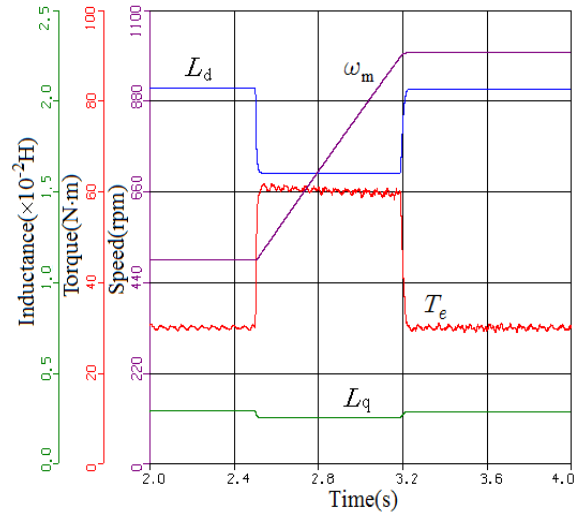


Fig. 4. Simulation result by the proposed method

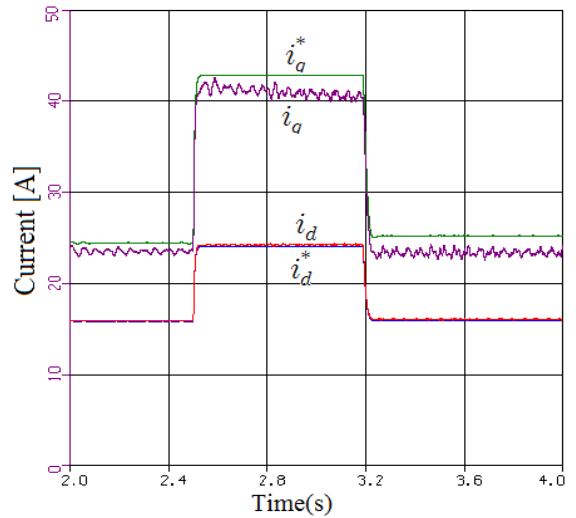


Fig. 5. Currents by the proposed method

그림 5는 그림 4의 시뮬레이션과 동일한 조건이며 d축 및 q축 전류를 나타내고 있다. i_d^* 와 i_d 가 거의 일치하는 모습을 나타내고 있으나, i_q^* 와 i_q 는 일치하지 못하여 오차가 발생하고 있음을 알 수 있다. 2.8s에서의 i_d 는 약 24.2A이며 이때의 그림 4의 L_d 는 16mH로 계산되었다. 그림 1에서 전류가 24.2A일 때 L_d 가 약 16mH임을 확인할 수 있다. 2.8s에서 i_q^* 는 42.8A이며,

i_q 는 약 41.3A로 계산되어서 1.5A 정도의 오차가 발생하고 있다. 이 때 그림 4의 L_q 는 2.6mH로 계산되었다. 이 L_q 는 q축 전류가 42.8A일 때의 값인데, 실제의 q축 전류는 41.3A이므로 q축 인덕턴스의 값은 비동조에 의한 약간의 오차가 발생하고 있음을 의미한다.

그림 6과 7은 기존방법[5]에 의한 시뮬레이션 결과이다. 기존방법은 자기포화에 의한 인덕턴스의 변화를 고려하지 않았는데, 그림 6은 정격전류(49A)의 조건에서의 d축 및 q축 인덕턴스의 값인 0.009H,

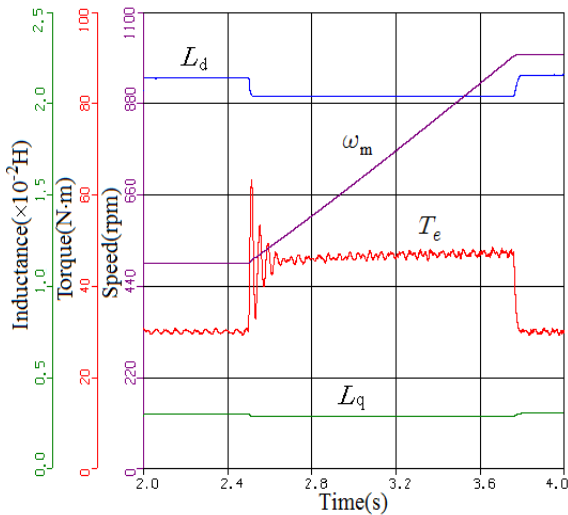


Fig. 6. Simulation result by conventional method

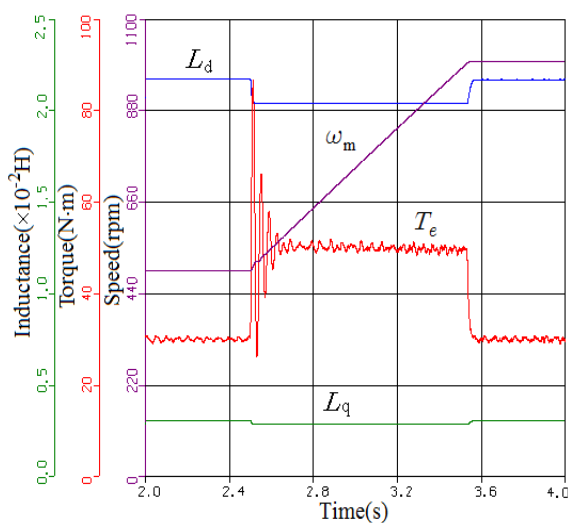


Fig. 7. Simulation result by conventional method

0.0025H를 각각 제어기의 인덕턴스 $L_{d,con}$, $L_{q,con}$ 로 설정한 경우의 결과이며, 그림 7은 고정자전류가 25A일 때의 값인 0.0156H, 0.0029H로 $L_{d,con}$, $L_{q,con}$ 이 설정된 경우의 결과이다. 부하는 30N.m이며, 속도지령은 2.5s에 500rpm에서 1,000rpm으로 변경된다. 전동기의 인덕턴스 L_d , L_q 는 그림에서와 같이 동작조건에 따라 변화하나 제어기의 인덕턴스가 $L_{d,con}$, $L_{q,con}$ 으로 일정하므로 비동조에 의해서 제어성능이 저하되어 그림 4의 제안한 방법에 비해서 가속이 늦게 됨을 알 수 있다. 또한 속도지령이 변경되는 순간에 토크에 큰 진동이 발생하는 모습을 나타내고 있다.

그림 8은 기존방법에 의한 제어결과를 나타낸다. 부하는 30N.m이며, 속도지령은 2.5s에 500rpm에서 1,000rpm으로 변경된다. 식 (10) 및 (11)에 의한 전압 지령치를 계산할 때 d축 및 q축 인덕턴스에 그림 1에서 얻은 인덕턴스의 값을 대입하여 계산한다. 자기포화에 의한 인덕턴스의 변화를 고려하였지만 식 (16) 및 (17)의 인덕턴스의 시간미분항과 [4]에서 제안한 최대토크제어를 고려하지 않았기 때문에 그림 4의 결과와 비교하여 가속이 느리게 이루어지며, 또한 속도지령이 변할 때 토크에 진동이 발생하는 모습을 나타내고 있다.

그림 9는 제안한 방법에 의한 결과인데, 식 (16) 및

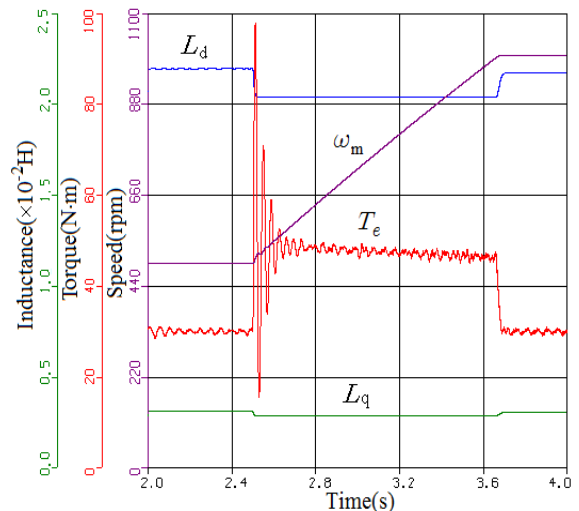


Fig. 8. Simulation result by conventional method (without maximum torque control)

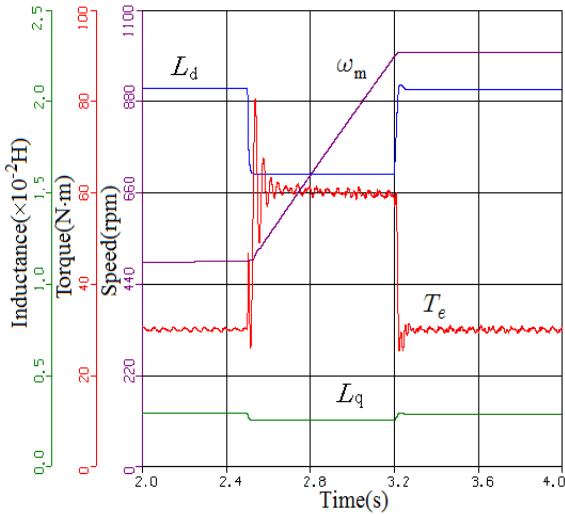


Fig. 9. Simulation result by the proposed method (without derivative of inductance)

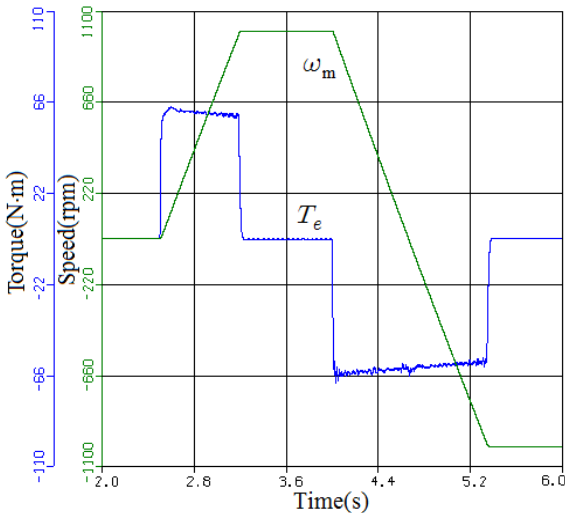


Fig. 10. Speed reversal

(17)에서 인덕턴스의 미분항 $\frac{dL_d}{dt}$ 및 $\frac{dL_q}{dt}$ 를 고려하지 않은 경우의 시뮬레이션 결과이다. 부하는 30N.m이며, 속도지령은 2.5s에 500rpm에서 1,000rpm으로 변경된다. 그림 4의 경우와 비교할 때 속도지령이 바뀌는 순간에 토크에 큰 진동이 발생함을 알 수 있으며, 가속은 약간 느리게 이루어짐을 알 수 있다.

그림 10은 제안한 방법에 의한 정역운전의 결과이다. 무부하이며, 속도지령은 4s에 1,000rpm에서

-1,000rpm으로 변경된다. 제안한 방법에 의해서 정역 운전이 원활히 이루어짐을 알 수 있다.

6. 결론

본 논문에서는 3상 동기궤력턴스전동기의 전류센서리스 최대토크제어를 제안하였다. 인덕턴스의 변화 및 최대토크제어를 고려하지 않은 기존방법과 비교한 결과, 본 논문에서 제안한 방법에 의해서 개선된 제어 결과를 얻었음을 확인하였다. 또한 제안한 방법에서 인덕턴스의 시간미분항을 고려하지 않은 경우의 제어 결과와의 비교를 통하여 인덕턴스의 시간미분항의 효과를 살펴보았다. 그러나 q축 전류에서 약간의 오차가 발생하였으며, 향후 오차를 저감하기 위한 연구가 필요함을 알 수 있었다. 본 논문에서 제안한 알고리즘을 적용한다면 자기포화를 고려한 개선된 전류센서리스 제어의 결과를 얻을 수 있을 것으로 사료된다.

감사의 글

이 연구는 서울과학기술대학교 교내연구비의 지원으로 수행되었습니다.

References

- [1] C. Mademlis, "Compensation of magnetic saturation in maximum torque to current vector controlled synchronous reluctance motor drives", IEEE Trans. on EC, vol.18, no.3, pp. 379-385, 2003.
- [2] J. Nakatsugawa, Y. Kawabata, T. Endoh, M. Kitamura, and J. Kaneda, "A fundamental investigation about maximum torque control of synchronous reluctance motor", PCC 2002, pp. 704-709, 2002.
- [3] K. Ide, A. Yamazaki, S. Morimoto, and H. Iura, "Position sensorless control for synchronous reluctance machine based on instantaneous power optimization", IECON 2011, pp. 1977-1982, 2011.
- [4] M.-H. Shin, "A Maximum Torque Control of Synchronous Reluctance Motors Considering Magnetic Saturation", Journal of KIIEE, vol. 28, no. 10, pp. 89-94, 2014.
- [5] T. Matsuo and T. A. Lipo, "Current sensorless field oriented control of synchronous reluctance motor," IEEE IAS93, pp. 672-678. 1993.
- [6] Soltani, J. and Abootorabi Zarchi, H., "Robust optimal speed tracking control of a current sensorless synchronous reluctance motor drive using a new sliding

- mode controller,” PEDS 2003. pp. 474-479, 2003.
- [7] H.-K. Chiang, C.-A. Chen, B.-R. Lin, and K.-S. Hsu, “Current sensorless integral variable structure controller of synchronous reluctance motor,” IFEMC 2006.
- [8] C.-A. Chen, H.-K. Chiang, B.-R. Lin and C.-H. Tseng “Sliding Mode Grey Speed Control of Synchronous Reluctance Motor Current Sensorless Drive,” IEEE, ICIC07, 2007.
- [9] C.-A. Chen, H.-K. Chiang, and B.-R. Lin, “Current sensorless synchronous reluctance motor speed drive with the novel fuzzy sliding mode control”, 3rd IEEE Conference on Industrial Electronics and Applications, pp.449-454, 2008.
- [10] C.-A. Chen, H.-K. Chiang, and B.-R. Lin, “The novel adaptive sliding mode control for current sensorless synchronous reluctance motor speed drive,” ICIT 2008. pp. 1-6, 2008.
- [11] M.-H. Shin, “Considerations on the Performance of Current Sensorless Control of a Synchronous Reluctance Motor”, Journal of KIIE, vol. 26, no. 1, pp. 61-65, 2012.
- [12] K.-I. Woo, “Torque Characteristics Analysis of Synchronous Reluctance Motor by Winding Function Theory”, Journal of KIIE, vol. 25, no. 7, pp. 26-31, 2011.

◇ 저자소개 ◇



신명호 (申明昊)

1967년 11월 27일생. 1989년 한양대 공대 전기공학과 졸업. 1991년 동 대학원 전기공학과 졸업(석사). 2001년 동 대학원 전기공학과 졸업(박사). 1991~1996년 삼성종합기술원 근무(선임연구원). 2002년 8월~현재 서울과학기술대학교 전기정보공학과 교수.