

동기릴럭턴스전동기의 자기포화를 고려한 최대토크제어

(A Maximum Torque Control of Synchronous Reluctance Motors Considering Magnetic Saturation)

신명호*

(Myoung-Ho Shin)

Abstract

This paper presents a synchronous reluctance motor drive for maximum torque to current (MTC) considering magnetic saturation. Measured d-axis and q-axis inductances are used to obtain current angle vs. maximum torque curve using torque equation. Maximum torque to current control is achieved by the current angle and stator current for maximum torque from the current angle vs. maximum torque curve at a given torque reference.

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

1. 서 론

동기릴럭턴스전동기는 구조가 간단하고 저가이며 튼튼하고 유도전동기보다 고효율이며 스위치드 릴럭턴스전동기 보다 토크리플이 적은 장점으로 산업현장에서 많은 주목을 받고 있다[1-6].

동기릴럭턴스전동기의 제어에서 단위 전류 당 최대 토크(Maximum Torque to Current, MTC) 제어는 동손을 최소화하여 전동기의 효율을 증가시킨다[3]. 자기회로가 포화되지 않은 경우에 MTC 제어는 d축 전

류와 q축 전류가 같도록 하나, 자기회로가 포화되면 d축 전류와 q축 전류가 다른 값에서 이루어진다[2-4].

참고문헌 [2]에서 구현된 MTC 제어에서는 d축 인덕턴스와 q축 인덕턴스를 일정한 값으로 두어서 자기포화를 고려하지 않은 문제점이 존재한다.

[3]은 자기포화를 고려한 연구로서, d축 전류의 변화에 따른 d축 인덕턴스를 측정하여 수식을 전개하여 MTC 제어를 구현하였으나 수식전개를 가능하도록 하기 위하여 q축 전류의 변화에 따른 q축 인덕턴스의 변화를 고려하지 않은 문제점이 존재한다.

[4]에서는 전류변화에 따른 d축 및 q축 인덕턴스를 측정하여 자기포화를 고려한 MTC 제어를 구현하였는데, 최대토크의 변화에 따른 전류각 및 고정자전류의 변화를 직선으로 근사화시켜서 오차가 발생하는 문제가 존재한다. 또 최대토크를 발생시키는 고정자전류 및 전류각을 구하기 위하여 측정된 d축 및 q축 인덕턴스를 사용하지 않고 510rpm의 조건에

* 주저자 : 서울과학기술대학교 전기정보공학과 교수
* 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
접수일자 : 2014년 8월 5일
1차심사 : 2014년 9월 15일, 2차심사 : 2014년 9월 20일
심사완료 : 2014년 9월 27일

서 고정자전류를 변화시키면서 실험을 통해서 구하게 된다.

본 논문에서는 [4]의 방법과는 다른 방법으로서, 전류의 변화에 따른 d축 및 q축 인덕턴스를 구한 후, 선택된 고정자전류의 값들에서의 최대토크 및 전류각을 측정된 d축 및 q축 인덕턴스를 사용하여 토크식으로 구하고, 구한 최대토크 값들 사이를 선형 근사화하여 전류각 대 최대토크 곡선 및 고정자전류 대 최대토크 곡선을 구한다. 이렇게 구한 전류각 대 최대토크 곡선 및 고정자전류 대 최대토크 곡선을 이용하여 MTC 제어를 하는 방법을 제안한다. 제안한 방법은 시뮬레이션 결과를 통하여 타당성을 입증한다.

2. 동기릴럭턴스전동기 모델

동기 릴럭턴스전동기의 전압, 자속, 토크 및 전류는 다음 식으로 표현된다[4].

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

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

$$\lambda_d = L \dot{i}_d + L_{md} \dot{i}_d \quad (3)$$

$$\lambda_q = L \dot{i}_q + L_{mq} \dot{i}_q \quad (4)$$

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

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

여기서 L_{md} , L_{mq} 는 각각 d축 및 q축 자화인덕턴스, L_l 은 고정자누설인덕턴스, P 는 극수, L_d , L_q 는 d축 및 q축 고정자인덕턴스, i_d , i_q 는 d축 및 q축 고정자전류이다.

i_d , i_q 가 이루는 전류각 ϕ 는 다음과 같다.

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

3. d축 및 q축 인덕턴스

본 논문에서 사용한 동기릴럭턴스 전동기의 사양은 [5]에서 사용한 전동기 사양을 이용한다. 표 1은 동기 릴럭턴스전동기의 파라미터를 나타내고 있다.

표 1. 동기릴럭턴스전동기 파라미터
Table 1. Synchronous Reluctance motor parameters

Rated speed	1000 rpm
Stator resistance	0.111 Ω/phase
Number of poles	6
Rated torque	60 N.m
Rated current	49 A

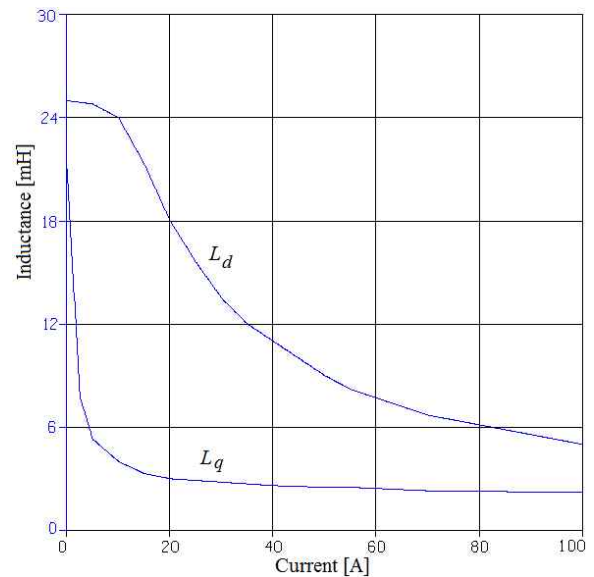


그림 1. 전류 변화에 따른 L_d 및 L_q

Fig. 1. L_d and L_q vs. current

그림 1은 전류변화에 따른 d축 및 q축 인덕턴스를 나타내고 있다. 전류의 변화에 따라 L_d 와 L_q 가 변화하고 있는 모습을 나타내고 있는데, 전류의 증가에 따라 자기회로의 포화 때문에 인덕턴스가 감소하고 있는 모습을 나타내고 있다. 인덕턴스의 값은 전류가 0A, 2A, 5A, 10A, 15A, 20A, 25A, 30A, 35A, 40A, 50A, 55A, 70A, 100A일 때의 값이며, 각각의 값 사이의 구간은

선형 보간하였다.

4. 제안한 방법

그림 2는 고정자전류가 $i_s = 45A$ 로 일정할 때 i_d 의 변화에 따른 토크 T_e 의 그래프를 나타내고 있다. i_d 는 0A부터 0.1A씩 증가시키며, 때 i_d 에서의 i_q 는 식 (6)을 정리하여 $i_q = \sqrt{45^2 - i_d^2}$ 의 식을 이용하여 구한다. 토크는 식 (5)의 $T_e = \frac{3P}{4}(L_d - L_q)i_d i_q$ 를 이용하여 구한다. 이 때 때 i_d 에서의 L_d 의 값과 때 i_q 에서의 L_q 의 값은 그림 1의 그래프에서 전류에 대응하는 인덕턴스의 값을 구하여 식 (5)에 대입하여 토크를 계산하였다. 그림 2에서, i_d 를 변화시킬 때 $(L_d - L_q)$ 는 i_d 의 증가에 따라 감소하고 있는 모습을 나타내고 있는데, i_d 의 증가에 따라 L_d 는 감소하지만 L_q 는 증가하기 때문임을 알 수 있다. 또한 토크가 최대가 되는 전류 i_d 가 존재하는 것을 알 수 있는데, 최대토크 T_{max} 는 전류각 $\phi = 61.68^\circ$ 에서 56.14N.m로 계산되었다.

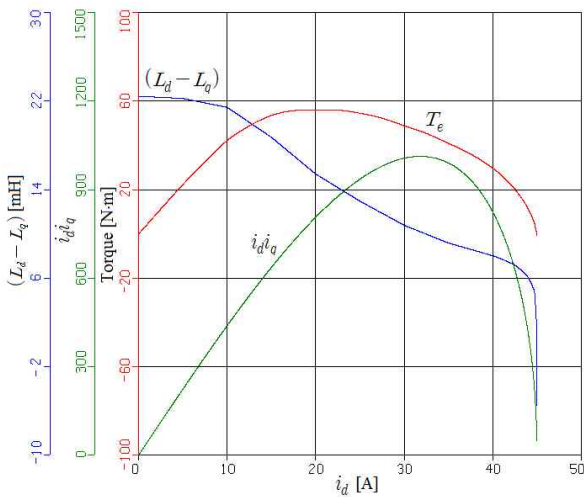


그림 2. $i_s = 45A$ 일 때 i_d 변화에 따른 T_e
 Fig. 2. T_e vs. i_d at $i_s = 45A$

표 2는 i_s 에 따른 최대토크 및 전류각을 나타내고 있다. 2A에서부터 49A까지 11개의 전류값을 정해서 그림 2에서 설명한 방법으로 계산해서 때 고정자 전류에서의 최대토크와 전류각을 구한 결과이다. 전동기가

토크(T_{max})를 발생하기 위한 고정자전류의 값이 T_{max} 에 대응하는 i_s 의 값일 때 MITC 제어가 구현됨을 의미한다.

표 2. 주어진 i_s 에서의 최대토크 및 전류각
 Table 2. T_{max} and ϕ at given stator currents

i_s (A)	T_{max} (N.m)	ϕ (degree)
49	62.79	63.16
45	56.14	61.68
40	48.16	62.9
35	40.27	60.49
30	32.44	57.81
25	24.72	53.42
20	17.04	51.65
15	10.16	48.14
10	4.453	47.08
5	1.026	47.62
2	0.108	52.04

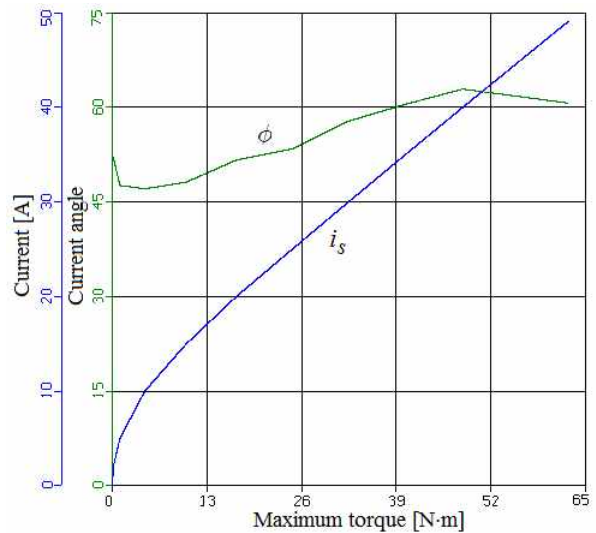


그림 3. 고정자전류 대 최대토크 및 전류각 대 최대토크
 Fig. 3. Stator current versus maximum torque and current angle versus maximum torque

그림 3은 표 2에 있는 값을 사용해서 최대토크 변화에 따른 고정자전류와 전류각을 그래프로 나타낸 것이다. 점과 점 사이는 직선으로 선형 보간하였다. 고정자전류가 0A일 때 토크는 0N.m로 하여 i_s 대 T_{max} 그

래프를 완성하였다.

그림 4는 제안한 MTC 제어 블록도를 나타낸다. 입력전압은 3상 교류 220V이며, 정류기로 정류되어 인버터에 입력되는 전압은 325V이다. Inverter는 space vector PWM 방식이며, 전압의 제한치는 $188V(=325/\sqrt{3})$ 이다. 전동기 속도는 absolute encoder를 사용하여 측정되며, 속도제어기에서 토크 지령 T_e^* 가 출력되며, "MTC Control Block"에서 그림 3의 그래프를 이용하여 고정자전류의 지령 i_s^* 와 전류 각 지령 ϕ^* 가 출력된다. 토크지령 T_e^* 를 그림 3의 x축의 "Maximum torque"로 놓고, 대응하는 고정자전류 i_s 와 전류각 ϕ 의 값을 그래프에서 계산하여 고정자전류 및 전류각의 지령치로 사용한다. 계산된 i_s^* 와 ϕ^* 는 최대토크를 발생하기 위한 고정자전류 및 전류각이므로 MTC제어가 이루어지게 됨을 의미한다.

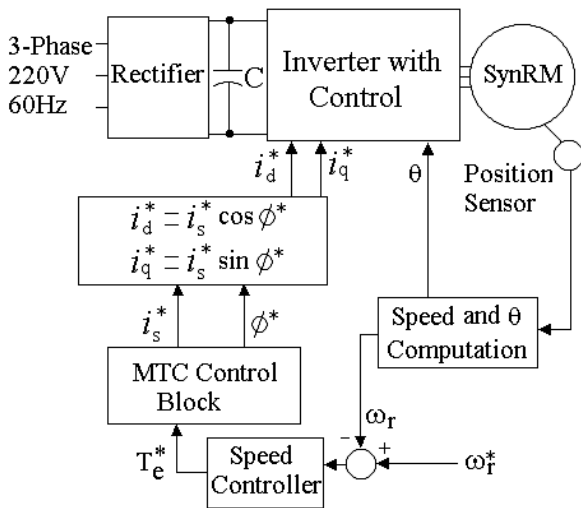


그림 4. 제안한 최대토크 제어 블록도
Fig. 4. Proposed MTC control block diagram

참고문헌 [4]에서 제안한 방법은 그림 4의 그래프를 구할 때 측정된 인덕턴스를 이용하는 것이 아니라 510rpm에서의 고정자전류를 변화시키면서 최대토크와 전류각을 측정하여 사용하였으며, 그림 3처럼 구간별로 선형 근사화된 그래프가 아니라 전체를 하나의 직선으로 선형 근사화시켰다. 본 논문에서 제안한 방법은 [4]와는 달리, 측정된 인덕턴스의 값을 이용하여

선택된 고정자전류의 값에서의 최대토크를 구하며, 매 구간을 직선으로 선형 근사화시키는 것이다.

5. 시뮬레이션 결과

시뮬레이션은 ACSL(Advanced Continuous Simulation Language)를 사용하여 수행하였다. 전류제어주기는 $100\mu\text{sec}$, 속도제어주기는 1msec이다.

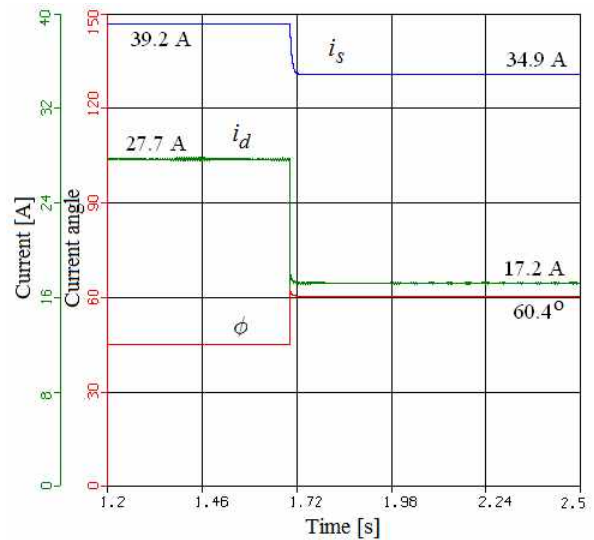


그림 5. 제안한 MTC 제어결과
Fig. 5. Simulation results of the proposed MTC control

자기포화를 고려하지 않았을 때 동기전동기의 최대토크는 전류각이 45° 일 때, 즉 d축 전류와 q축 전류가 같을 때 얻어지며 [1-2, 6], 참고문헌 [3]과 [4]는 각각 자기포화를 고려한 MTC 방법을 제안한 논문으로서, 제안한 방법의 효과를 전류각이 45° 일 때의 결과와 제안한 방법을 비교하여 제시하였다. 그림 5는 부하가 40N.m이며, 전동기가 1,000rpm으로 회전하는 경우의 시뮬레이션결과이다. 전류각은 45° 로 고정되어 있다가 1.7초에 제안한 MTC 제어 알고리즘을 적용한다. 제안한 방법을 적용하기 전에 전류각은 45° 이며, 이 때 고정자전류는 39.2A이었는데, 제안한 방법을 적용한 후 전류각은 60.4° 로 변화하였고, 고정자전류는 34.9A로 감소하였음을

알 수 있다.

그림 6은 속도지령을 500rpm으로 증가시켰다가 다시 1,000rpm으로 증가시킨 경우의 시뮬레이션결과이다. 부하는 0.5초에 20N.m가 가해지며, 1초에 속도지령은 1,000rpm으로 증가된다. 전동기속도 ω_r 은 속도지령을 추종하도록 제어되고 있음을 알 수 있다. 속도지령의 변화시에도 제안한 알고리즘을 적용하여 안정적으로 제어되고 있음을 알 수 있다.

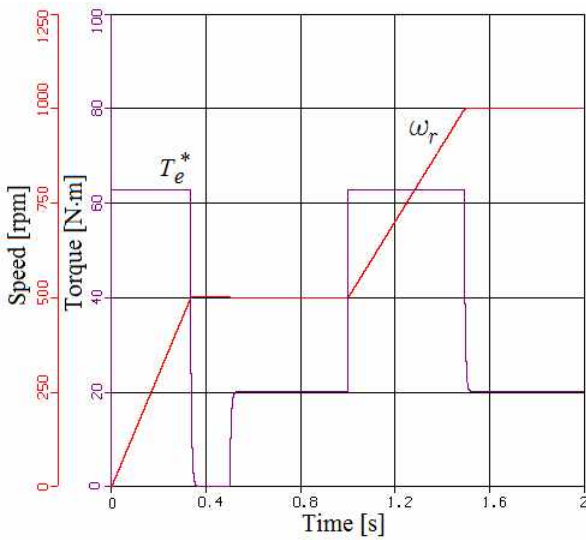


그림 6. 속도 변화시 시뮬레이션 결과
Fig. 6. Simulation results as speed changes

그림 7은 속도지령은 1,000rpm이며, 부하토크가 24.72N.m에서 5초에 56.14N.m로 변경된 경우의 시뮬레이션결과이다. 전동기속도 ω_r 은 부하토크가 증가할 때 1,000rpm에서 996.5rpm으로 약간 감소하였다가 다시 1,000rpm으로 제어되는 모습을 나타내고 있다. 고정자전류 i_s 는 25.03A에서 부하 증가에 따라 45.08A로 증가했으며, 전류각 ϕ 는 53.44°에서 61.67°로 증가한다. 표 2에서, T_{max} 가 24.72N.m일 때 i_s 가 25A이고, T_{max} 가 56.14N.m일 때 i_s 가 45A인 것과 그림 7의 결과와 비교할 때 부하토크 변화 전과 후의 고정자전류가 거의 일치함을 알 수 있다. 따라서 제안한 방법에 의해서 MTC 제어가 이루어졌음을 알 수 있다. 또한 부하 변화시에도 제안한 방법을 적용한 제어가 안정적으로 이루어졌음을 알 수 있다.

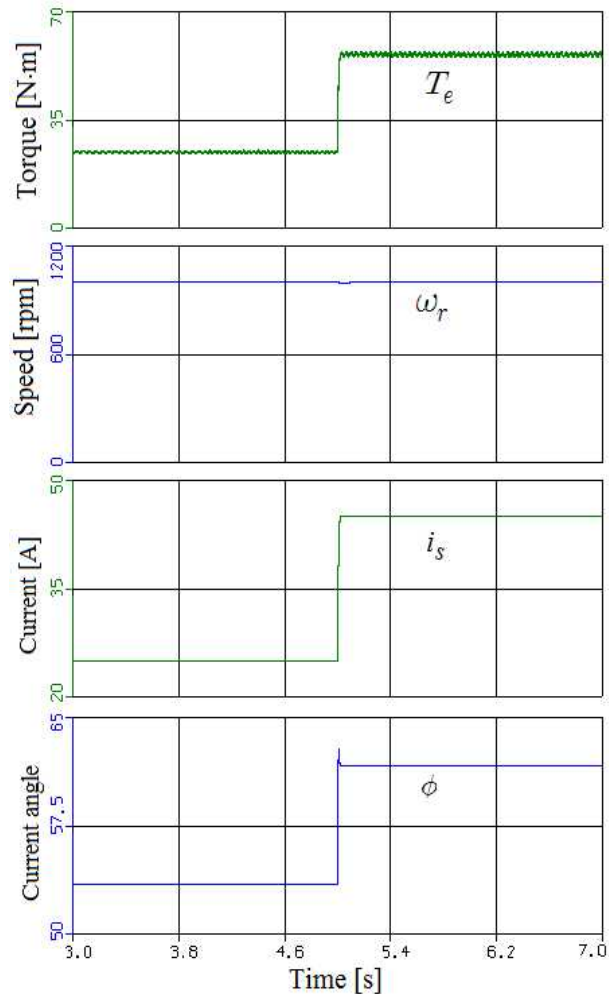


그림 7. 부하 변화시 시뮬레이션 결과
Fig. 7. Simulation results as load torque changes

6. 결 론

본 논문에서는 3상 동기릴럭턴스 전동기에 단위 전류 당 최대토크제어를 위한 알고리즘을 제안하였다. 제안한 알고리즘을 적용하여 제어한 결과 MTC 제어가 원활하게 수행되었음을 알 수 있었다. 또 부하를 인가한 상태에서 속도변화 및 일정속도에서 부하토크 변화시에도 제어가 안정적으로 이루어짐을 알 수 있었다. 본 논문에서 제안한 알고리즘을 적용한다면 자기포화를 고려한 향상된 MTC 제어의 결과를 얻을 수 있을 것으로 사료된다. 향후 인덕턴스 값들 사이의 선형보간에 의한 오차를 감소시키기 위한 연

구와 실험에 의한 이론의 타당성 검증이 필요한 것으로 사료된다.

감사의 글

이 연구는 서울과학기술대학교 교내 학술연구비 지원으로 수행되었습니다.

References

- [1] Myoung-Ho Shin, "Considerations on the Performance of Current Sensorless Control of a Synchronous Reluctance Motor", Journal of KIIEE, vol. 26, no. 1, pp. 61-65, 2012.
- [2] C.-A. Chen, H.-K. Chiang, B.-R. Lin, and C.-H. Tseng, "Maximum Torque Control of Synchronous Reluctance Motor Speed Drive Based on the Lyapunov Function Stability Theorem", ICIEA 2007, pp. 2103 - 2108, 2007.
- [3] 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.
- [4] 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.
- [5] 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.
- [6] K. Malekian, M. R. Sharif, and J. Milimonfared, "An optimal current vector control for synchronous reluctance motors incorporating field weakening ", Advanced Motion Control, 2008, pp. 393-398, 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.