

## 직접 토크 제어를 이용한 리럭턴스 동기 전동기의 최대 효율제어

박홍일, 김남훈, 최경호, 김동희, 김민희\*  
 영남대학교, \*영남이공대학

### An Optimal Efficiency Control of Reluctance Synchronous Motor using Direct Torque Control

Hong-il Park, Nam-Hun Kim, Kyeong-Ho Choi, Dong-Hee Kim, Min-Huei Kim\*  
 Yeungnam University, \*Yeungnam College of S & T

#### ABSTRACT

This paper presents an implementation of direct torque control(DTC) of Reluctance Synchronous Motor(RSM) with an efficiency optimization using the 32bit DSP TMS320C31. The influence of iron loss can not neglected as high speed and precision torque control of RSM, so the optimal current ration between torque current and exciting current analytically derived to drive RSM at maximum efficiency. For RSM, torque dynamics can be maintained even with controlling the flux level because the generated torque is directly proportional to the stator current. The experimental results for an RSM are presented to validate the applicability of the proposed method. The developed control system is shown high efficiency features with 1.0KW RSM having 2.57 ratio of d/q reluctance.

Key Words : DTC, Efficiency optimize, RSM

#### 1. 서 론

최근 산업의 급속한 발전으로 에너지 절감에 대한 관심이 지속적으로 고조되고 있음에 따라 전동기의 효율향상은 에너지 저감측면에서 중요한 요소 중의 하나가 되었다. 일반적으로 산업 분야에 많이 사용되고 있는 유도 전동기의 경우는 효율 제어를 위해 자속의 크기를 낮출 경우 토크의 동특성이 영향을 받을 수 있지만, 리럭턴스 동기 전동기의 경우는 전류를 변환하여 자속 직접 제어가 가능하므로 효율 최대화를 위해 자속을 직접 조절하여도 토크 동특성이 그대로 유지되는 장점이 있다.

최근에는 빠른 동특성을 위해서 직접 토크제어

(Direct Torque Control ; DTC)를 도입한 제어시스템이 많이 연구되고 있다<sup>[1]-[13]</sup>. 직접 토크제어는 히스테리시스 제어를 사용하므로 제어구조가 디지털 형태로 아주 단순하고, 빠른 동적 응답특성이 요구되는 시스템에 큰 장점을 가지는 제어방식이다. 따라서 본 연구에서는 직접 토크제어에 의한 RSM의 최적효율제어에 대해서 전압, 전류방정식을 바탕으로 이론 해석하고, 실험을 통해 이론해석을 입증하고, 효율개선에 따른 여러 가지 시스템에 대한 응용 가능성을 검증할 것이다.

#### 2. 직접 토크제어

일반적으로 동기전동기의 직접 토크제어는 자속과 토크를 독립적으로 제어하여 빠른 응답특성을 얻을 수 있는 장점이 있고, 제어구조가 간단하여 토크의 동적 특성이 전동기 파라미터 변동에 영향을 적게 주고, 많은 제어기의 채용과 복잡한 알고리즘 계산에 요구되는 연산시간을 감소시킬 수 있는 특징을 가지고 있어 점차적으로 많은 범위에서 적용되어지고 있다. 이 방법은 전동기의 전압과 전류를 측정하여 토크와 자속을 연산하고, 그 지령치와 비교한 후 look-up table에서 원하는 전압벡터를 선정하여 출력하고 스위칭 벡터는 자속의 크기와 방향을 고려하여 선택된다. RSM의 회전자의 쇄교자속은 식 (1-1)과 같은 방정식으로 표현되며, 토크는 식 (1-2)와 같이 된다<sup>[3]</sup>.

이러한 방법으로 스위칭 벡터의 선택에 따라 회전하고 있는 자속의 궤적을 결정하고, 이와 같이 고정자의 쇄교자속이 결정되면 식 (1-2)에 의하여 발생 토크를 계산할 수 있다<sup>[4][5]</sup>.

$$\begin{aligned} \Phi_d &= L_d i_d \\ \Phi_q &= L_q i_q \end{aligned} \quad (1-1)$$

$$T_e = \frac{3}{2} \frac{P}{2} \left(1 - \frac{L_q}{L_d}\right) \Phi_d i_q \quad (1-2)$$

### 3. 최대 효율 제어

그림 1은 동기 좌표계에서의 RSM 등가회로를 보여주고 있다. 저항  $r_s$ 는 고정자 저항으로 동손을 유발시키며,  $r_m$ 은 철손저항으로 역기전력성분, 인덕턴스성분과 병렬로 구성되어있고,  $i_{do}$ 는 자속을 발생시키는 전류성분,  $i_{qo}$ 는 토크를 발생시키는 전류성분으로 실제로 측정할 수 없으므로 계산 또는 추정되어야 하고, 등가회로부터 식(2-1)을 구할 수 있다. 여기서  $i_{qo}, i_{do}$ 는 d-q축 고정자 전류성분으로 실제 측정할 수 있는 단자 측의 전류분이고,  $L_d, L_q$ 는 각각 d-q축 인덕턴스를 나타낸다.

$$v_{ds} = r_s i_{ds} + \frac{d}{dt}(L_d i_{do}) - \omega_e L_q i_{qo} \quad (2-1)$$

$$v_{qs} = r_s i_{qs} + \frac{d}{dt}(L_q i_{qo}) + \omega_e L_d i_{do} \quad (2-2)$$

$$\begin{aligned} i_{do} &= i_{ds} - i_{dm} \\ &= i_{ds} - \frac{1}{r_m} \left( \frac{d}{dt}(L_d i_{do}) - \omega_e L_q i_{qo} \right) \end{aligned} \quad (2-3)$$

$$\begin{aligned} i_{qo} &= i_{qs} - i_{qm} \\ &= i_{qs} - \frac{1}{r_m} \left( \frac{d}{dt}(L_q i_{qo}) + \omega_e L_d i_{do} \right) \end{aligned}$$

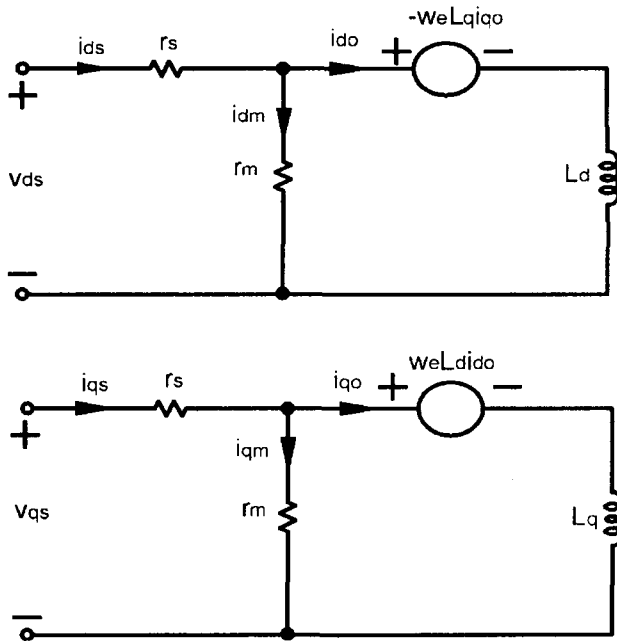


그림 1. RSM 등가회로.  
Fig. 1 Equivalent circuit of RSM

식 (2-4)는 철손 저항을 고려한 토크 식으로 전류  $i_{qo}, i_{do}$ 와 비례관계가 있다.

$$T_e = \frac{3}{2} \frac{P}{2} (L_d - L_q) i_{do} i_{qo} \quad (2-4)$$

여기서 P는 극의 수를 나타낸다.

RSM의 토크는 d-q축 전류의 곱에 비례하므로 같은 토크 출력에 각 분배에 따라 하나의 자유도가 있으며, 고정자 전류의 동기 좌표계에서의 d축에 대한 전류 위상각을 ( $\theta_{is} (\theta_{is} = \tan^{-1}(\frac{i_{qs}}{i_{ds}}))$ )라 하면 이 전류 위상각이 중요한 변수가 되며, 전류 위상각에 대하여 많은 연구들이 발표되었다<sup>[10]-[12]</sup>.

위에서 제시한 바와 같이, RSM은 자속이 전류에 직접 비례하므로 효율 최대화를 위해 자속을 조절하여도 토크 동특성이 유지되는 장점이 있다. 만약 동손만을 고려한 최대 효율운전은 전류 위상각이 45°로 하여 d-q축 전류를 똑같이 인가하면 되나, 실제 회로에서 동손과 철손이 함께 발생하므로 동손과 철손을 고려한 전류 위상각을 적용해야한다. 정상 상태에서 철손을 고려한 전압, 전류식과, 효율 최대화에 대한 전류 위상각은 전기적인 정상 상태만 고려하면 된다<sup>[4][13]</sup>.

d-q축 토크분 전류  $i_{qo}, i_{do}$ 의 함수로 동손과 철손을 계산하면 다음과 같다.

동손:

$$P_{cop} = \frac{3}{2} r_s (i_{ds}^2 + i_{qs}^2) \quad (2-5)$$

$$= \frac{3}{2} r_s \left\{ \left( i_{do} - \frac{\omega_e L_q i_{qo}}{r_m} \right)^2 + \left( i_{qo} + \frac{\omega_e L_d i_{do}}{r_m} \right)^2 \right\}$$

철손:

$$\begin{aligned} P_{ir} &= \frac{3}{2} r_m (i_{dm}^2 + i_{qm}^2) \\ &= \frac{3}{2} r_m \left\{ \left( \frac{\omega_e L_q i_{qo}}{r_m} \right)^2 + \left( \frac{\omega_e L_d i_{do}}{r_m} \right)^2 \right\} \end{aligned}$$

(2-6)

여기서, 손실은 고정자에 집중되고, 회전자에는 손실이 거의 존재하지 않으며 자속의 고조파 성분에 의하여 회전자 표면에서 발생될 수 있는데, 그 양은 매우 작다고 볼 수 있다<sup>[13]</sup>.

전체 손실  $P_{total}$ 을 최소화시킴으로 전동기 효율은 최대화 할 수 있다. 토크에 직접 관여하는 d-q축 전류비를  $\zeta = i_{qo}/i_{do}$ 라 하고, 출력 토크가 식(2-8)과 같이 일정하다고 가정할 때, 주어진 속도와 토크에 대하여 전체 손실을 최소화하는 최적비는 식(2-9)과 같다.

$$\frac{\partial P_{total}}{\partial \zeta} = 0 \quad (2-7)$$

그리고,

$$i_{do} i_{qo} = \text{constant} \quad (2-8)$$

식 (2-7)을 풀면, 토크에 대한 최적비  $\zeta_{or}$ 는 식 (2-9)과 같이 된다.

$$\zeta_{or} = \sqrt{\frac{r_s r_c^2 + (r_s + r_c)(\omega_e L_d)^2}{r_s r_c^2 + (r_s + r_c)(\omega_e L_q)^2}} \quad (2-9)$$

식 (2-9)에서 철손이 무시할 만큼 크다면 철손 저항은 무한대가 된다. 즉 다시 말하면  $r_c \rightarrow \infty$ 가 되고, 토크 최적비  $\zeta_{or}$ 는 1이 되어 전류 위상각은  $45^\circ$ 가 되면 동손은 최소가 되어진다<sup>[4]</sup>. 이러한 조건을 만족하기 위한 기준자속은 식 (2-10)과 같이 된다.

$$\Phi_s^* = \frac{I_s}{\sqrt{2}} \sqrt{L_d^2 + L_q^2} \quad (2-10)$$

본 논문에서는 지금까지 알아본 바와 같이 전류 위상각을  $45^\circ$ 로 하여 철손을 무한히 크다고 가정하고, 동손을 최소로 하는 최적 비를 적용한 최대 효율 제어를 구현한다.

#### 4. 시스템 구성

본 연구에서 시스템 구성은 IGBT VSI(Voltage Source Inverter)를 사용하고, TI사의 DSP인 TMS320C31을 사용하였다. 전압과 전류 검출에 따라 실제 자속과 토크를 관측하고, 실제 자속과 토크와의 비교에 의한 결과분에 따라 최적의 스위칭 전압벡터를 결정하여 전동기를 구동하는 시스템 구성이다. 그림 2는 본 연구에서 사용한 DTC를 사용한 최적효율제어의 구성도를 보여주고 있다.

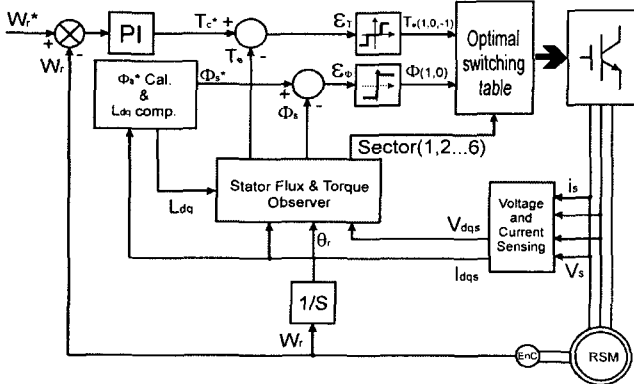


그림 2. 시스템 구성도  
Fig. 2. System configuration

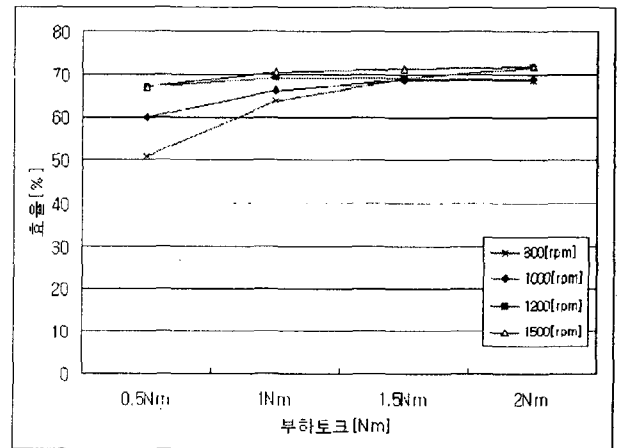
표 1. 적용된 리액턴스 동기전동기의 파라미터  
Table 1. Applied motor parameters

정격부하	4.2 [N.m]	정격전류	5.0 [A]
관성모멘트	0.003 [kg.m <sup>2</sup> ]	Ld	76 [mH]
고정자극수	4	Lq	28 [mH]
회전자극수	4	r <sub>s</sub>	1.0 [Ω]

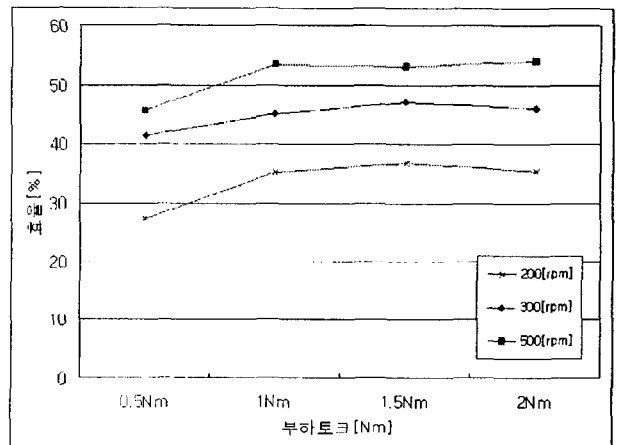
#### 5. 실험 결과

본 논문에서는 직접토크제어를 사용한 리액턴스 동기 전동기의 최대 효율 제어를 구현하였다. 표 1은 실제 적용된 리액턴스 전동기의 파라미터를 보여주고 있다.

최대효율 구현을 위해 손실을 최소로 하는 최적비를 연산하고 이 최적비를 1로(철손은 무한대)하는 전류위상각을  $45^\circ$ 로 하여 동손을 최소로 하였다. 아래 그림 3은 전류위상각을  $45^\circ$ 로 유지하였을 때에 고속에서의 효율과 저속에서의 효율특성을 나타낸 것이고, 그림 4는 일정여자방식의 고속에서의 효율과 저속에서의 효율특성을 나타내고 있다. 각각을 비교하면 0.5[Nm]의 경부하시에는 효율 변화가 5[%]이상으로 향상되고, 부하토크가 점점 증가하여 1.5[Nm]이상에서는 효율 변화가 거의 없음을 알 수 있었다.

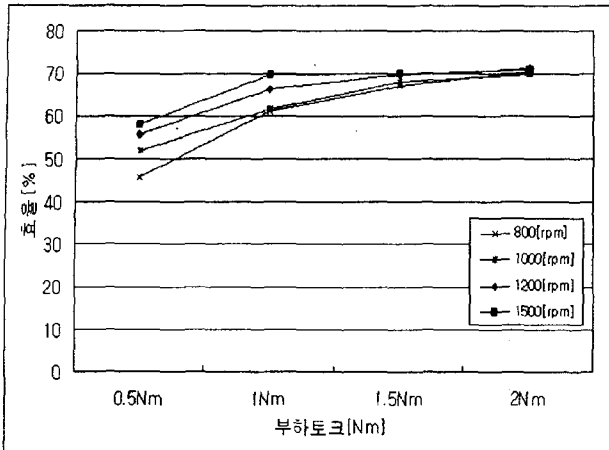


(a) 고속에서의 효율

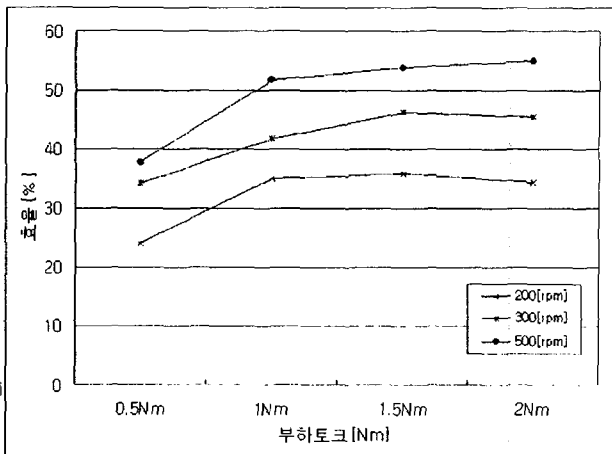


(b) 저속에서의 효율

그림 3. 전류 위상각을  $45^\circ$ 유지.



(a) 고속에서의 효율



(b) 저속에서의 효율

그림 4. 일정 여자 방식.

## 6. 실험 결과

전동기에는 많은 손실분이 존재하게 된다. 이런 손실분은 입력에서 출력으로 에너지 전달차원에서 효율향상을 저해하는 요인이 된다. 그 중에서 가장 크게 작용하는 것이 스위칭 손실과 전동기 저항손과 마찰손을 들 수 있는데, 본 논문에서는 그 중 하나인 저항손만을 구현하여 효율향상이 눈에 띄게 큰 변화를 이룰 수는 없었다. 향후 손실의 범위를 더욱 더 크게 하여 효율향상의 극대화를 이룰 뿐 아니라 그 정밀도를 높일 예정이다.

## 참고 문헌

- [1] Peter Vas, "Sensorless Vector and Direct Torque Control", Oxford Press, 1998
- [2] Bimal K. Bose, "Power Electronics and Variable Frequency Drives", IEEE Press, 1997
- [3] PETER VAS, SENSORLESS VECTOR AND DIRECT TORQUE CONTROL. OXFORD PRESS 1998.
- [4] T. Matsuo and T. A. Lipo, "Field Oriented Control of Synchronous Reluctance Machine," in Proc. PESC.1993.
- [5] Bimal K. Bose, "Power Electronics and Variable Frequency Drives," IEEE Press, 1997.
- [6] Iron Boldea, "Electric Drives," CRC Press, 1999.
- [7] Iron Boldea, "Reluctance Synchronous Machines and Drives," Oxford Science, 1996.
- [8] Hyeoun-Dong Lee, Seog-Joo Kang, and Seung-Ki Sul, "Efficiency-Optimized Direct Torque Control of Synchronous Reluctance Motor using Feedback Linearization," IEEE Trans. on IE, Vol. 46, No. 1, pp. 192-198, Feb. 1999.
- [9] H. Murakami, Y. Honda, S. Morimoto, and Y. Takeda, "Performance Evaluation of Synchronous Reluctance Motor and the Order motors with the Same Distributed Winding and Stator Configuration," T. IEEE Japan, Vol. 120-D, No.8/9, pp. 1062-1074, 2000.
- [10] A. Vagati and T. A. Lipo, "Synchronous Reluctance Motors and Drives : A New Alternatives," IEEE Industry Application Society Annual Meeting Tutorial, 1994.
- [11] R. E. Betz, R. Lagerquist, M. Jovanovic and T. J.E. Miller, "Control of Synchronous Reluctance Machines," IEEE Transactions on Industry Applications, vol. 29, no. 6, November/December, pp. 1110~1121, 1993.
- [12] A. Chiba and T. Fukao, "A Closed Loop Control of Super High Speed Reluctance Motor for Quick Response," IEEE Transactions on Industry Applications, vol. 28, no. 3, May/June, pp. 600~606, 1993.
- [13] Seog-Joo Kang and Seung-Ki Sul "Efficiency Optimized Vector Control of Synchronous Reluctance Motor." IAS '96., Vol. 1, pp. 117-121, 1996.