동기 리럭턴스 전동기의 에너지 절감을 위한 효율 최적화 제어

이정철*, 이홍균*, 정동화*
* 순천대학교 공과대학 전기제어공학과

Efficiency Optimization Control for Energy Saving of Synchronous Reluctance Motor

Jung-Chul Lee*, Hong-Gun Lee*, Dong-Hwa Chung*
Dep of Electronic Control, Sunchon Univ.

ABSTRACT

This paper is proposed an efficiency optimization operation algorithm for synchronous reluctance motor (SynRM) using current phase angle control technique. The SynRM has to controlled with the optimal current phase angles with load and operation speed variation, to obtain high efficiency over the wide speed ranges. An efficiency optimization condition in SynRM which minimizes the copper and iron losses is derived based on the equivalent circuit model of the machine.

The objective of the efficiency optimization control algorithm, compensating the optimum current angle, is to seek a combination of d and q-axis current components which provides minimum losses at a certain operating point in steady state. The usefulness of the proposed efficiency optimization control is verified through vector-controlled inverter system with the SynRM.

1. 서 론

에너지 절감은 항상 일반산업계에서는 전동기 드라이브 시스템의 에너지 절감을 위하여 매우 많은 관심을 기울이고 있다. 동기 리럭턴스 전동기(Synchronous Reluctane Motor)는 전력용 반도체와 전력전자 기술의 발전으로 벡터제어를 사용하는 전류제어 PWM 인버터의 적용이 가능하게 되었다.[1]-[5]

SynRM의 최적 제어 운전은 부하 상태에 따라 전동기 파라미터인 인덕턴스 및 철손의 변화를 고려하고 입력 전류각을 적절히 선택하여 최적의 전압 패턴을 결정한다. L. Xu , Lipo[6]는 철손과 자기포화가 미치는 영향을 고려할 때 최대 효율과 전류당 최대 토크 운전이 최적 전류각 45°이상에 수행됨을 제시하였다. 그러나 800[rpm]의 일정 속도에서만 부하의 변화에 따른 전류각의 변화에 대해서 다루었다.

SynRM은 광범위한 속도 범위에서 고 효율을 얻기 위해 부하와 속도의 변화 상태에서 최적의 전류 위상각으로 제어되어야 한다. 그러나 효율 최적화 동작을 위한 입력 전류 위상각은 동작 상태에 따른 철손과 자기 포화에 많은 영향을 받는다.

본 연구에서는 최적 효율 동작을 실현하기 위한 철손과 동손을 고려한 모델을 이용하여 효율이 최적화 되는 d축 전류의 조건을 구한다. 효율 최적화 제어는 종래의 일정 d축 전류 제어와 비교하여 토크의 동특성을 유지하면서 손실이 최소화되는 응답 특성을 구한다. 따라서 본 연구에서는 효율 최적화제어에 대한 타당성을 입증하고 그 결과를 제시한다.

2. 본 론

2.1 철손을 고려한 SynRM의 모델링

Fig.1은 동기 리럭턴스 전동기의 철손저항을 고려한 d축과 q축의 등가회로를 나타낸다. Fig.2는 철손을 고려한 경우의 동기 리럭턴스 전동기의 전류 벡터도를 나타낸다. Fig. 1의 등가회로에서 전압과 전류방정식을 구하면 식 (1)~(4)와 같다.

$$V_d = R_s i_d + L_d \frac{di_{dm}}{dt} - \omega_r L_q i_{qm} \tag{1}$$

$$V_q = R_s i_q + L_q \frac{di_{qm}}{dt} + \omega_r L_d i_{dm} \tag{2}$$

$$i_d = i_{dm} + i_{dc} = i_{dm} + (L_d \frac{d}{dt} i_{dm} - \omega_r L_q i_{qm})/R_c \tag{3}$$

$$i_q = i_{qm} + i_{qc} = i_{qm} + (L_q \frac{d}{dt} i_{qm} + \omega_r L_d i_{dm})/R_c \tag{4}$$

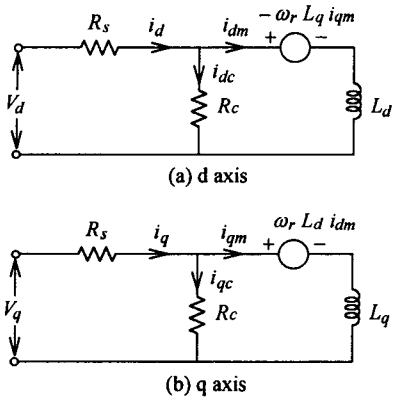

Fig. 1 Equivalent circuit of SynRM with core loss resistance

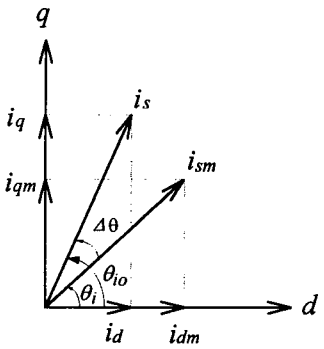

Fig. 2 Current vector diagram of SynRM with core loss resistance

발생토크는 전류의 성분 i_{dm}와 i_{qm}에 비례한다.

$$T_e = \frac{3}{2}\frac{P}{2}(L_d - L_q) i_{dm} i_{qm} \tag{5}$$

2.2 효율 최적화 제어

효율 최적화를 위한 전류 위상각에서는 전기적인 정상상태만 고려한다. 철손을 고려한 정상 상태에서 d축과 q축 전류방정식은 다음과 같다.

$$i_{dm} = i_d + \omega_r L_q i_{qm} / R_c \tag{6}$$

$$i_{qm} = i_q - \omega_r L_d i_{dm} / R_c \tag{7}$$

$$\lambda_m = \sqrt{(\lambda_{dm}^2 + \lambda_{qm}^2)} \tag{8}$$

식 (6)~(8)를 이용하여 철손과 동손을 구한다. 동손은 식 (9)과 같다.

$$P_{cl} = \frac{3}{2} R_s i_s^2 = \frac{3}{2} R_s (i_d^2 + i_q^2)$$
$$= \frac{3}{2} R_s \{(i_{dm} - \frac{\omega_r L_q i_{qm}}{R_c})^2 + (i_{qm} + \frac{\omega_r L_d i_{dm}}{R_c})^2\} \tag{9}$$

철손은 식 (10)과 같이 구할 수 있다.

$$P_{ll} = \frac{3}{2}\frac{(\omega_r \lambda_m)^2}{R_c} = \frac{3}{2}\omega_r^2 \{\frac{(L_q i_{qm})^2}{R_c} + \frac{(L_d i_{dm})^2}{R_c}\} \tag{10}$$

식 (5)를 다음과 같이 변형하여 전체 손실(P_{total})을 구하면 식 (12)와 같다.

$$i_{qm} = \frac{T_e}{\frac{3}{2}\frac{P}{2}(L_d - L_q) i_{dm}} = \frac{K}{i_{dm}} \tag{11}$$

$$P_{total} = \frac{3}{2}\{A i_{dm}^2 + B i_{dm}^{-2} + C\} \tag{12}$$

동기 리럭턴스 전동기의 효율 최대화는 전체손실 P_{total} 을 최소화하여 얻을 수 있다. 전체손실 P_{total}의 최소값을 구하기 위해 i_{dm}로 미분하여 전체손실 P_{total}이 최소가 되는 조건을 만족하는 $i_{dm-\min}$ 은 식(13)과 같이 구할 수 있다. 효율 최적화 제어를 수행하기 위한 지령 d축과 q축 전류에 의한 전류 위상각은 식(14)과 같이 구해진다.

$$i_{dm-\min} = (B/A)^{1/4} \tag{13}$$

$$\theta_i^* = \sqrt{\frac{R_c^2 R_s + (\omega_r L_d)^2 (R_c + R_s)}{R_c^2 R_s + (\omega_r L_q)^2 (R_c + R_s)}} \tag{14}$$

Fig .3은 SynRM의 효율 최적화 제어를 위한 시스템의 블록도를 나타낸다.

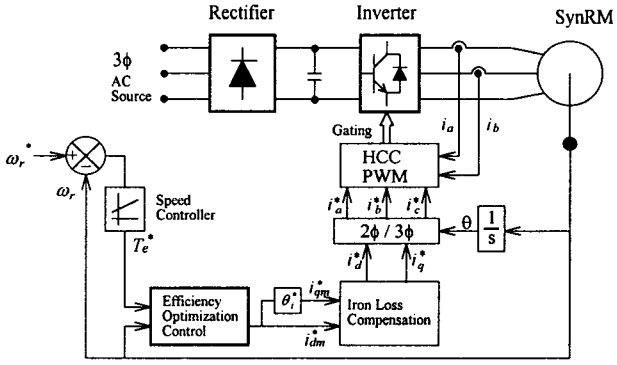

Fig. 3 Block diagram of efficiency maximum controller

3. SynRM의 효율 최적화 결과

표 1은 3.75[kW] 동기 리럭턴스 전동기의 파라미터를 나타낸다.

Table 1 Parameters of 3.75 kW synchronous reluctance motor

정격 용량	3.75[kW]
정격 전압	250[V]
정격 토크	9.8[N·m]
정격 주파수	60[Hz]
극수	4
고정자 저항(R_s)	0.238[Ω]
d축 인덕턴스(L_d)	43[mH]
q축 인덕턴스(L_q)	3.5[mH]
관성계수	0.026[kg·m²]

Fig. 4은 철손을 고려한 상태에서 부하 $T_L = 2[N \cdot m]$를 준 조건에서 d축의 여자 전류 i_{dm}를 변화할 때 이 i_{dm}의 변화에 따른 전체손실 P_{total}, 전류위상각 θ_i 과 효율의 변화를 나타내고 있다. (a)는 속도($\omega_r = 1800[rpm]$) (b)는 속도($\omega_r = 1000[rpm]$) (c)는 속도($\omega_r = 600[rpm]$)일 때 효율 최적화 제어를 수행한다. Fig.4에서 보는 바와 같이 손실이 최소화되는 점(↓)에서 효율이 최대가 되는 것을 알 수 있다.

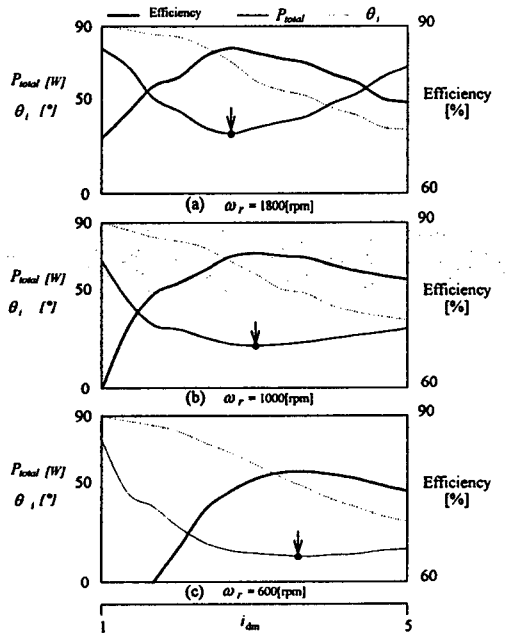

Fig. 4 Variation of i_q, i_s as a function i_d

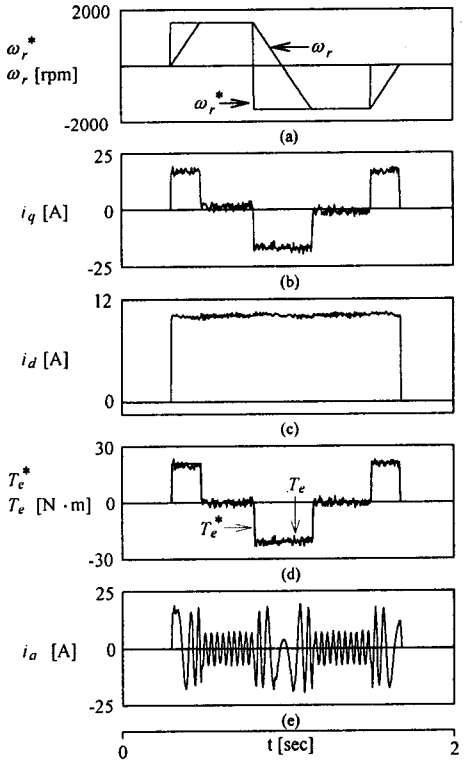

Fig. 5 Response characteristics of constant d-axis current controller

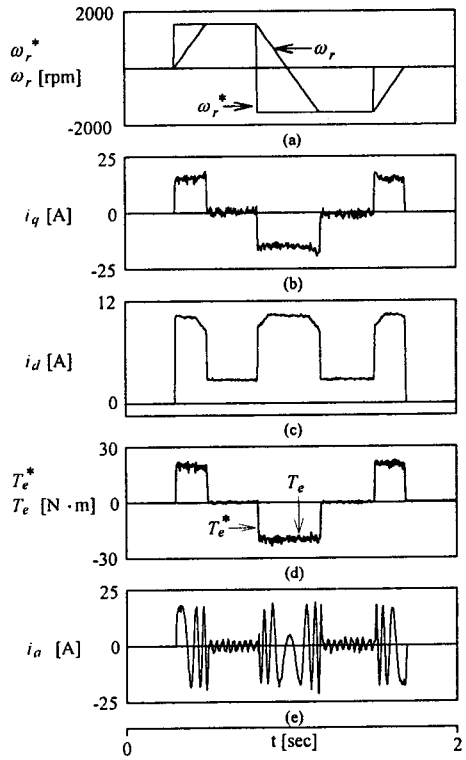

Fig.6 Response characteristics of efficiency optimum controller

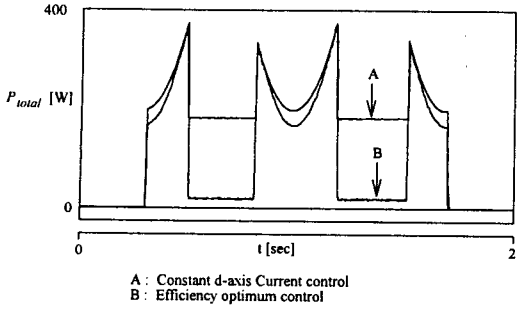

Fig. 7 Total loss comparison of contant d-axis current control and efficiency optimum control

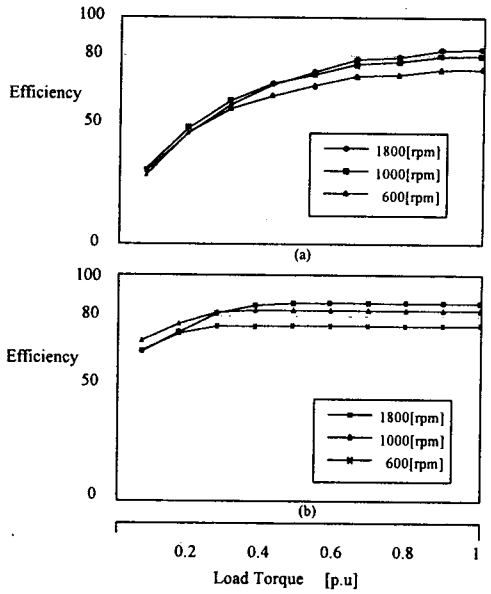

Fig. 8 Efficiency comparison of load variation

Fig. 5은 철손 저항을 고려한 동기 리럭턴스 전동기의 정·역회전 응답에 대한 일정 d축 전류 제어 특성을 나타낸다.

Fig. 6은 Fig.5의 일정 d축 전류 제어와 같은 조건에서 본 논문에서 제시한 효율 최적화 제어를 위한 d축 전류 제어의 응답 결과를 나타낸다. 효율 최적화 제어를 수행하고 일정 d축 전류 제어와 같은 토크 특성을 유지하고 있다.

Fig. 7은 일정 d축 전류 제어와 효율 최적화 제어에서 전체 손실을 비교한다. 이 그림에서 A는 일정 d축 전류 제어이며 B는 효율 최적화 제어에서 전체 손실을 나타낸다. 두 경우의 손실을 비교하면 과도상태에서는 거의 유사한 손실이 발생하고 정상상태에서는 효율 최적화 제어는 손실이 일정 d축 전류 제어보다 대폭적으로 감소된다.

Fig. 8은 정격속도 내의 정상상태에서 일정 d축 전류 제어와 효율 최적화 제어시 부하토크에 대한 효율의 변화를 나타낸다. (a)는 일정 d축 전류 제어시, (b)는 효율 최적화 제어시의 효율을 나타낸다. 효율 최적화 제어에서 효율이 향상되며 특히 경부하에서 효율이 대폭적으로 증가한다. 이는 효율 최적화 제어는 정상상태의 손실이 매우 감소되며 효율은 대폭적으로 증가한다.

4. 결 론

본 논문에서는 동기 리럭턴스 전동기의 고성능 운전을 위하여 효율 최적화 제어를 제시하였다. 효율 최적화 제어시 전동기는 최소 손실점을 찾아 운전하고 이 점에서 효율은 최대가 됨을 알 수 있었다. 효율 최적화 제어는 종래의 일정 d축 전류 제어와 비교하여 속도, 토크 및 전류의 동특성을 유지하면서 전체 손실도 대폭적으로 감소하였다. 그리고 정상 상태의 운전시 경부하에서 효율이 매우 향상되었다. 따라서 본 연구에서 제시한 효율 최적화의 타당성을 입증할 수 있었다.

참 고 문 헌

[1] T. J. E. Miller, "Brushless Permanent -Magnet and Reluctance Motor Drives," Clarendon Press, Oxford, pp. 149-191, 1989.

[2] L. Xu and J. Yao, "A Compensated Vector Control Scheme of a Synchronous Reluctance Motor Including Saturation and Iron Loss," *IEEE Transactions on Industry Applications*, vol. 28, no. 6, November /October, pp. 1330-1338, 1992.

[3] 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.

[4] I. Boldea, Z. X. Fu and S. A. Nasar, "Performance Evaluation of Axially -Laminated Anisotropic (ALA) Rotor Reluctance Synchronous Motors," *IEEE Transactions on Industry Applications*, vol. 30, no. 4, July/August, pp. 977-985, 1994.

[5] T. Matsuo and T. A. Lipo, "Field Oriented Control of Synchronous Reluctance Machines," IEEE Power Electronics Specialists Conference, pp. 425-431, 1993.

[6] L. Xu, X. Xu, T. A. Lipo, and D.W. Novotny, Vector control of a synchronous reluctance motor including saturation and iron loss, *IEEE Transactions* on Industry Applicatins, vol. IA-27, no. 5, pp. 9777-985, 1991.