

동기 리럭턴스 전동기의 약계자 영역을 고려한 효율 최적화 제어

이정철, 이홍균, 정동화
 * 수천대학교 공과대학 전기제어공학과

Efficiency Optimization Control for Field-Weakening Region of Synchronous Reluc

Jung-Chul Lee, Hong-Gyun Lee, Dong-Wha Chung
 *Dept. of Electrical Control, Sunchon Univ.

Abstract - Synchronous reluctance motors(SynRM) for the application such as an electric vehicle, compressor drives of air conditioner and machine tool spindle drives require a wide field-weakening speed range. In order to improve the efficiency performance in such applications, this paper has examined the loss and the efficiency characteristics of SynRM mainly in the field-weakening speed region over the base speed.

The control strategy in order to offer a efficiency optimization operation is shown and the copper and iron losses driven the equivalent circuit model of the machine is minimized.

The usefulness of the proposed efficiency optimization control is verified through the SynRM drive system

1. 서 론

최근 산업계에서는 고속 반도체 소자의 개발과 마이크로프로세서의 기술 진보에 의해 가변속 AC드라이브에 대한 관심이 집중되고 있으며 이에 관련된 연구가 많이 이루어지고 있다. [1]-[3] 이러한 추세에 부응하여 동기 리럭턴스 전동기(Synchronous Reluctance Motor)는 드라이브 성능을 향상시켜 냉장고, 에어컨 등의 가전용에서 공작기계, 펌프, 전기자동차등 산업용에 이르기까지 핵심 전력전자기에 적용되고 있다. 그러나, 경부하 조건을 포함한 약계자 제어에서 효율 특성에 대하여 상세한 연구가 이루어지지 않고 있다. 동작제한이나 전동기의 전 운전영역에서 효율 성능에 관한 연구는 SynRM드라이브의 고성능 제어를 위하여 매우 중요하다. [4]-[5]

SynRM의 효율 최적화 제어는 부하 상태에 따라 전동기 파라미터인 인덕턴스 및 철손의 변화를 고려하고 전류 위상각을 적절히 선택하여 최적의 전압 패턴을 결정한다.

본 연구에서는 SynRM의 주된 손실인 철손과 동손을 모델링하고 이 손실이 최소가 되는 전류 위상각을 구한다. 이 위상각으로 SynRM의 약계자 영역을 제어하며 전동기의 전 운전영역에서 효율 최적화 제어를 실현한다. 제시한 효율 최적화 제어에 대한 효용성을 입증하고 그 결과를 제시한다.

2. 본 론

2.1 철손을 고려한 SynRM의 모델링

그림1은 동기 리럭턴스 전동기의 철손저항을 고려한 d축과 q축의 등가회로를 나타낸다.

그림2는 철손을 고려한 경우의 동기 리럭턴스 전동기의 전류 벡터도를 나타낸다. 그림1의 등가회로에서 전압과 전류 방정식을 구하면 식(1)~(4)와 같다.

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

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

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

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

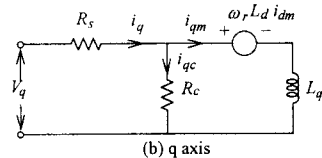
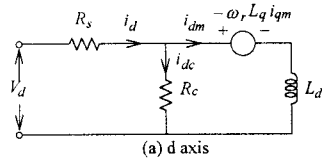


그림1 Equivalent circuit of SynRM with core loss resistance

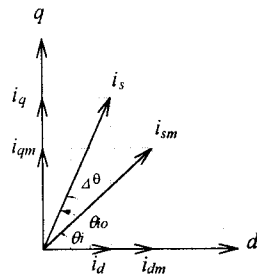


그림2 Current vector diagram of SynRM with core loss resistance

발생토크는 전류의 성분 i_{dm} 와 i_{qm} 에 비례한다.

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

2.2 효율 최적화 제어

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

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

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

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

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

$$\begin{aligned} P_{ci} &= \frac{3}{2} R_s i_s^2 = \frac{3}{2} R_s (i_d^2 + i_q^2) \\ &= \frac{3}{2} R_s \left\{ \left(i_{dm} - \frac{\omega_r L_d i_{qm}}{R_c} \right)^2 + \left(i_{qm} + \frac{\omega_r L_d i_{dm}}{R_c} \right)^2 \right\} \end{aligned} \quad (9)$$

철손은 식(10)과 같이 구할 수 있다.

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

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

$$P_{total} = \frac{3}{2} \{ A i_{dm}^2 + B i_{dm}^2 + C \} \quad (11)$$

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(12)과 같이 구한다. 효율 최적화 제어를 수행하기 위한 지령 d 축과 q 축 전류에 의한 전류 위상각은 식(13)와 같다.

$$i_{dm-min} = (B/A)^{1/4} \quad (12)$$

$$\theta_i^* = \sqrt{\frac{R_c^2 R_s + (\omega_r L_d)^2 (R_c + R_s)}{R_c^2 R_s + (\omega_r L_q)^2 (R_c + R_s)}} \quad (13)$$

그림3은 SynRM의 효율 최적화 제어를 위한 시스템의 블록도를 나타낸다.

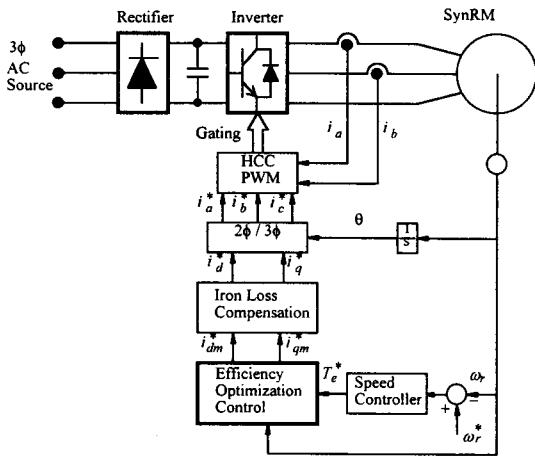


그림3 Block diagram of efficiency maximum controller

2.3 SynRM의 효율 최적화 결과

표1은 3.75[kW] 동기 리럭턴스 전동기의 파라미터를 나타낸다.

표1 Parameters of 3.75kW 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·m ²]

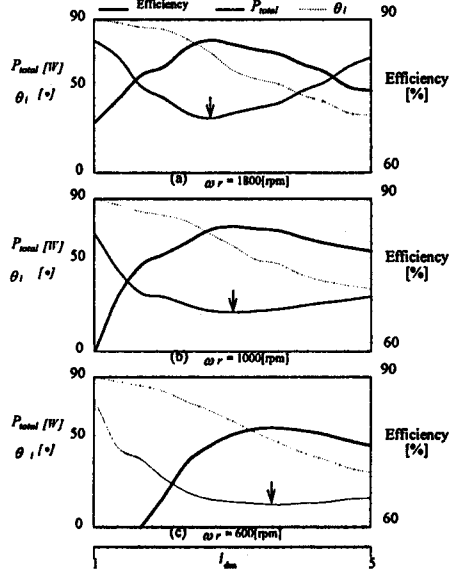


그림4 Variation of i_q, i_d as a function i_d

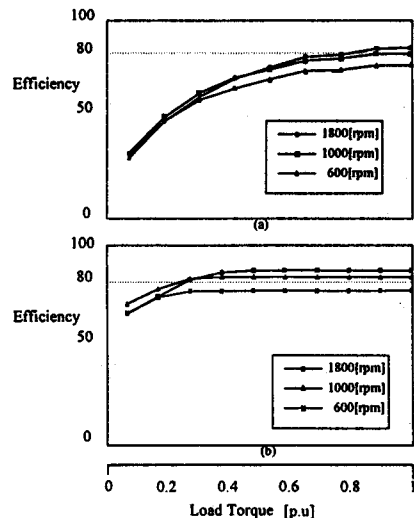


그림5 Efficiency comparison of load variation (within rated speed)

그림4은 철손을 고려한 상태에서 부하 $T_L = 1[N \cdot m]$ 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 나타낸다. (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. 그림4에서 손실이 최소화되는 점(↓)에서 효율이 최대가 된다. 그림5는 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 크게 나타나며 특히 경부하에서 효율이 대폭적으로 증가한다. 이는 효율 최적화 제어는 정상상태의 손실이 매우 감소되므로 효율이 증가한 결과이다.

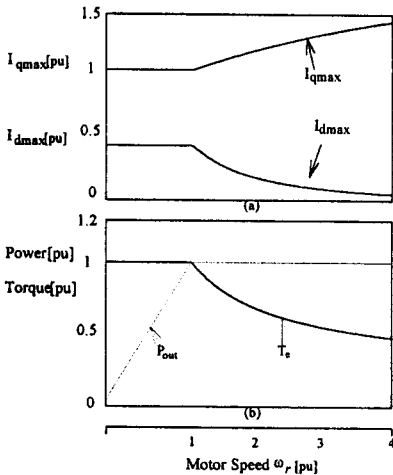


그림6 Variation maximum current, Torque and Power for Speed(ω_r)

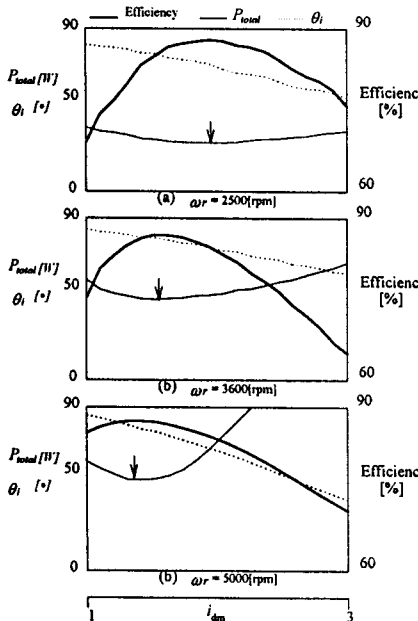


그림7 Variation of i_q, i_d as a function i_d

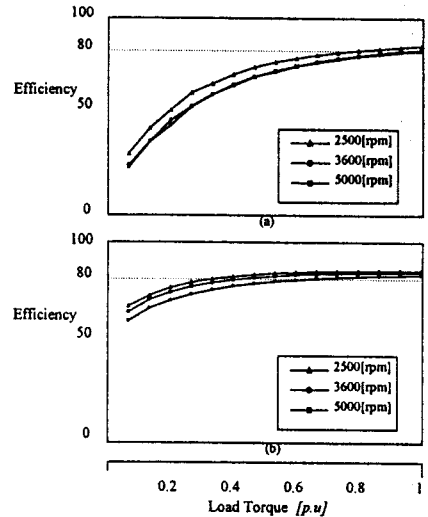


그림8 Efficiency comparison of load variation (over rated speed)

그림6은 고속 운전시 약계자 제어의 특성을 나타내고 있다. (a)는 전류제한 조건을 위해 d축과 q축 최대 전류가 변화하고 있으며 (b)는 동기 리럭턴스 전동기의 전류제한 조건하에서 속도에 따른 토크와 출력의 변화를 나타낸다. 그림7은 그림4와 동일한 조건에서 약계자 운전시 d축의 여자 전류 i_{dm} 를 변화할 때 이 i_{dm} 의 변화에 따른 전체손실 P_{total} , 전류위상각 θ_i 과 효율의 변화를 나타낸다. 약계자 운전시에도 손실이 최소화되는 점(↓)에서 효율이 최대가 된다.

그림8은 약계자 운전시 그림5와 같은 조건에서 일정 d축 전류 제어와 효율 최적화 제어의 효율을 나타내고 있다. 약계자 영역인 고속 운전중에도 효율 최적화 제어가 정상상태의 효율이 증가하고 있다.

3. 결 론

본 연구에서는 SynRM의 광범위한 속도에서 고성능 운전을 위한 효율 최적화 제어를 제시하였다. 동기 리럭턴스 전동기를 제어할 경우 최소 손실점을 추종하여 운전하였으며 이 운전점에서는 효율은 최대가 되었다. 정상상태 운전시 고속 영역인 약계자 영역에서 효율이 상승되며 전 운전영역에서 효율이 매우 향상되었다. 따라서 본 연구에서 제시한 효율 최적화 제어의 타당성을 입증할 수 있었다.

(참 고 문 헌)

- [1] R. E. Betz, R. Lagerquist, M. Jovanovic and T. Miller, "Control of Synchronous Reluctance Machines, *IEEE Transactions on Industry Applications* vol. 29, no. 6, November/ December, pp. 1110-1112
- [2] T. Matsuo and T. A. Lipo, "Field Oriented Control of Synchronous Reluctance Machines," *IEEE Power Electronics Specialists Conference*, pp. 425-431, 1991.
- [3] R. E. Betz, Control of synchronous reluctance m *IEEE-IAS, Annual Meeting*, Detroit, pp. 456-462 1991.
- [4] T. Matsuo and T. A. Lipo, Rotor design optimization of a synchronous reluctance machine, *IEEE Transactions on Energy Conversion*, vol. 9, no. 2, pp. 359-365 1994.
- [5] L. Xu, X. Xu, T. A. Lipo, and D.W. Novotny, control of a synchronous reluctance motor including saturation and iron loss, *IEEE Transactions on Industrial Applications*, vol. IA-27, no. 5, pp. 977-985, 1991