

동기 리럭턴스 전동기의 고성능 운전을 위한 효율 최적화 제어

정동화[†] · 이정철 · 이홍균

순천대학교 전기제어공학과
(2000. 9. 30. 접수 / 2001. 6. 16. 채택)

Efficiency Optimization Control for High Performance Operation of Synchronous Reluctance Motor

Dong-Hwa Chung[†] · Jung-Chul Lee · Hong-Gyun Lee

Department of Electrical Control Engineering, Suncheon National University
(Received September 30, 2000 / Accepted June 16, 2001)

Abstract : This paper is proposed an efficiency optimization control algorithm for a synchronous reluctance motor (SynRM) which minimizes the copper and iron losses. There exists a variety of combinations of d and q-axis current which provide a specific motor torque. The objective of the efficiency optimization controller is to seek a combination of d and q-axis current components, which provides minimum losses at a certain operating point in steady state. It is shown that the current components which directly govern the torque production have been very well regulated by the efficiency optimization control scheme. The proposed algorithm allows the electromagnetic losses in variable speed and torque drives to be reduced while keeping good torque control dynamics. Simulation results are presented to show the validity of the proposed algorithm.

Key Words : synchronous reluctance motor, efficiency optimization control, high performance, maximum torque control, iron loss compensation

1. 서 론

최근, 전 세계적으로 환경문제의 인식이 높아지고 에너지 및 자원의 절약이 요구되면서 가변속 드라이브에 대한 관심이 고조되고 있다. 전력용 반도체의 진보, 마이크로프로세서 및 DSP의 응용으로 가변속 드라이브에 대한 연구는 한층 박차를 가하게 되었다. 동기 리럭턴스 전동기(Synchronous Reluctance Motor) 드라이브는 냉장고, 에어컨 등의 가전용에서 공작기계, 펌프, 전기자동차등 산업용에 이르기까지 핵심 전력전자기기로 응용되고 있다.

SynRM은 유도전동기 보다 회전자손실이 작고 제어가 용이하며 단위 전류당 토크가 큰 장점을 갖고 있다. 또한 성능과 가격면에서도 유도전동기 보다는 우수하다. PMSM(Permanent Magnet Synchronous Motor) 보다 가격이 싸고 약계자 운전이 가능

한 점 등의 장점이 있다. SRM(Switched Reluctance Motor)보다 벡터제어의 구현이 용이하고 인버터의 토폴로지의 구성이 쉽다는 장점을 갖고 있다.

SynRM의 벡터제어에서 고정자전류의 d와 q축 성분은 상호 독립적인 변수이며, 어떤 속도에 대한 특정 토크는 d와 q축의 전류성분의 다양한 합성으로 얻을 수 있다.¹⁻⁵⁾ d와 q축 전류성분을 분해하여 특정 토크를 얻을 수 있으나 전동기의 효율은 매우 광범위하게 변화한다. d축 전류가 크면 철손이 커지고 d축 전류가 매우 작으면 전류 및 동손이 증가한다. 따라서 전동기의 모든 동작점에서 최적효율에 관계된 설정 토크를 구하면 이 토크에서 발생하는 최적전류를 얻을 수 있다.

효율 최적화 제어기는 전동기의 실제적 구현시에 나타나는 인덕턴스 포화, 철손 계수, 온도 및 고조파 영향 등을 파라미터 값으로 하는 손실모델에 의해 얻을 수 있다. 어떠한 동작점에서 제어기는 효율 최적화 동작조건을 계산하고 최적치를 추적할 때가

[†]To whom correspondence should be addressed.
hwa777@suncheon.ac.kr

지 모델에서 하나 이상의 변수를 조절한다. 이러한 최적치는 드라이브 조절기의 지령치로 사용한다.

이러한 연구의 유용성은 정확한 손실모델에 의존하여 얻어진다.

SynRM은 동일 토크에 대하여 d, q축 전류의 비율을 조정할 수 있는 한개의 자유도가 있으며, 단위 전류당 최대 토크 제어, 최대 역률 제어, 일정 d축 전류제어⁶⁾, 쇄교 자속당 최대 토크 제어⁷⁾ 등을 위한 전류 위상각이 제시되었다. 그리고 철심의 포화를 고려하면 전류 위상각이 변화되며 이를 고려한 전류 위상각도 연구되었다.⁸⁾ Fletcher⁹⁾는 동기형 리액턴스 전동기의 철손을 실험을 통하여 측정하고, 일정 d축 전류 제어보다 단위 전류당 최대 토크 제어를 통하여 전동기의 효율을 향상시킬 수 있었다. 그러나 철손분을 포함한 전류 위상각의 해석은 복잡하며 효율이 최적화된 d축 전류조건은 구하지 않았다.

본 논문에서는 SynRM의 고성능 운전을 위하여 손실이 최소가 되는 효율 최적화 제어를 제시한다. 추정 토크는 동기좌표계에서 실제속도와 전동기의 파라미터로부터 직접 계산하며 토크 제어기의 출력인 d, q축 전류는 지령 토크를 추종한다. SynRM에서 철손 및 포화에 의해 토크의 비선형성을 해결하기 위하여 철손을 고려한 모델을 대상으로 해석한다. 철손을 고려한 모델을 이용하여 손실이 최소화되고 효율이 최적화된 d축 전류의 조건을 구한다. 제시된 알고리즘에서는 간단한 철손 보상 루틴을 첨가하여 철손 때문에 야기되는 토크의 비선형성을 보상한다. 효율 최적화 제어는 종래의 d축 전류의 일정제어와 비교하여 손실의 최소화가 이루어졌으며 토크 성능도 양호하게 나타난다. 본 연구의 효율 최적화 제어의 타당성을 입증하고 그 결과를 제시한다.

2. 철손을 고려한 SynRM의 모델링

Fig. 1은 SynRM의 철손저항을 고려한 d와 q축의 등가회로를 나타낸다. 철손을 고려한 철손저항 R_c 는 속도전압과 병렬로 연결되어 있다. 토크를 발생하는 전류는 i_{do} 와 i_{qo} 이며 이는 철손을 발생시키기 때문에 단자전류 i_{ds} 와 i_{qs} 와는 다르다.

Fig. 2는 철손을 고려한 경우의 SynRM의 전류 벡터도를 나타낸다. Fig. 1의 등가회로에서 전압방정식을 구하면 다음과 같다.

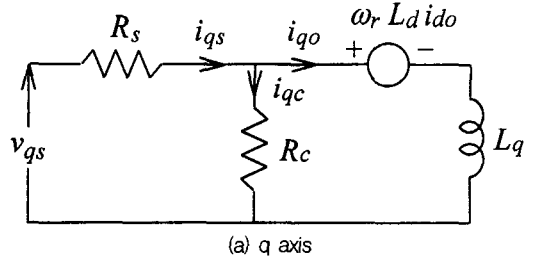
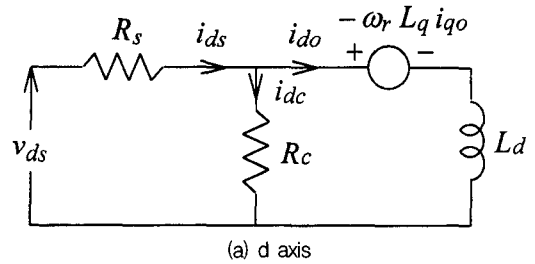


Fig. 1. Equivalent circuit of SynRM

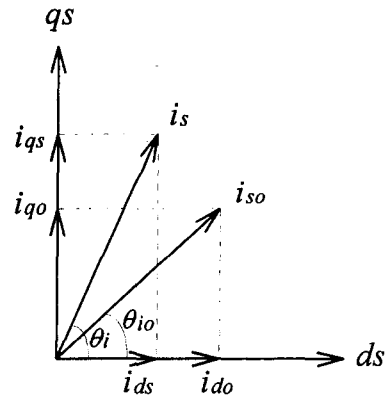


Fig. 2. Current vector diagram of SynRM

$$V_{ds} = R_s i_{ds} + L_d \frac{di_{do}}{dt} - \omega_r L_q i_{qo} \quad (1)$$

$$v_{qs} = R_s i_{qs} + L_q \frac{di_{qo}}{dt} + \omega_r L_d i_{do} \quad (2)$$

$$i_{ds} = i_{do} + i_{dc} = i_{do} + \frac{1}{R_c} (L_d \frac{d}{dt} i_{do} - \omega_r L_q i_{qo}) \quad (3)$$

$$i_{qs} = i_{qo} + i_{qc} = i_{qo} + \frac{1}{R_c} (L_q \frac{d}{dt} i_{qo} - \omega_r L_d i_{do}) \quad (4)$$

식 (1)-(4)를 상대 미분방정식 형태로 표시하면 다음과 같다.

$$p \begin{bmatrix} i_{d0} \\ i_{q0} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{-R_s}{L_d(1+R_s/R_c)} & \omega_r \frac{L_d}{L_q} \\ -\omega_r \frac{L_d}{L_q} & \frac{-R_s}{L_q(1+R_s/R_c)} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \frac{1}{L_d(1+R_s/R_c)} & 0 \\ 0 & \frac{1}{L_q(1+R_s/R_c)} \end{bmatrix} \quad (5)$$

발생 토크는 전류의 성분 i_{d0} 와 i_{q0} 에 비례한다.

$$T_e = \frac{3}{2} \frac{P}{2} (L_d - L_q) i_{d0} i_{q0} \quad (6)$$

3. 효율 최적화 제어

SynRM의 지속은 전류에 직접 비례하므로 효율 최적화를 위하여 지속을 조절한다. 지속을 조절할 경우에도 토크의 동특성은 그대로 유지할 수가 있다. 동손만 고려한다면 효율 최적화를 위한 전류 위상각은 45°로 하여 d - q 축 전류를 동일하게 인가한다. 그러나 실제로 동손과 함께 철손이 발생하고 있으므로 동손과 철손을 고려한 전류 위상각을 구한다. 효율 최적화를 위한 전류 위상각에서는 전기적인 정상상태만 고려하면 충분하다.

식(1)-(4)를 이용하여 철손과 동손을 구한다. 동손은 다음 식과 같다.

$$P_{cl} = \frac{e}{2} R_s i_s^2 = 3 \text{voer} 2R_s (i_{ds}^2 + i_{qs}^2) \quad (7) \\ = \frac{3}{2} R_s \left\{ \left(i_{d0} - \frac{\omega_r L_q i_{q0}}{r_c} \right)^2 + \left(i_{q0} + \frac{\omega_r L_d i_{d0}}{r_c} \right)^2 \right\}$$

철손은 다음 식과 구할 수 있다.

$$P_{ll} = \frac{3}{2} \frac{(\omega_r \lambda_m)^2}{R_c} = \frac{3}{2} \left\{ \frac{(\omega_r L_q i_{q0})^2}{R_c} + \frac{\omega_r L_d i_{d0}^2}{R_c} \right\} \quad (8)$$

따라서 전체 손실은 동손과 철손의 합으로 다음과 같다.

$$P_{total} = P_{cl} + P_{ll} = \frac{3}{2} \left[\left\{ R_s + \frac{(\omega_r L_d)^2}{R_c} + \frac{R_s}{R_c^2} (\omega_r L_d)^2 \right\} i_{d0}^2 + \left\{ R_s + \frac{(\omega_r L_q)^2}{R_c} + \frac{R_s}{R_c^2} (\omega_r L_q)^2 \right\} i_{q0}^2 + \left\{ \frac{2R_s}{R_c} \omega_r (L_d - L_q) \right\} i_{d0} i_{q0} \right] \quad (9)$$

전체손실 P_{total} 을 i_{d0} 항으로 표현하기 위해 식(6)을 변형하면 다음과 같다.

$$i_{q0} = -\frac{T_e^*}{\frac{3}{2} \frac{P}{2} (L_d - L_q) i_{d0}} = \frac{K}{i_{d0}} \quad (10)$$

식(10)을 식(9)에 대입하여 정리하면 다음과 같다.

$$P_{total} = \frac{3}{2} \{ A i_{d0}^2 + B i_{d0}^{-2} + C \} \quad (11)$$

여기서 계수는 다음과 같이 표현된다.

$$A = R_s + \frac{(\omega_r L_d)^2}{R_c} \left(1 + \frac{R_s}{R_c} \right)$$

$$B = K^2 \left\{ R_s + \frac{(\omega_r L_q)^2}{R_c} \left(1 + \frac{R_s}{R_c} \right) \right\}$$

$$C = 2K \frac{R_s}{R_c} \omega_r (L_d - L_q)$$

전동기의 효율의 최적화는 전체손실 P_{total} 을 최소화하여 얻을 수 있다.

P_{total} 를 i_{d0} 로 미분하여 영으로 놓는다.

$$\frac{dP_{total}}{di_{d0}} = \frac{3}{2} \{ 2A i_{d0} - 2B i_{d0}^{-3} \} = 3A i_{d0}^{-3} \{ i_{d0}^4 - b/A \} \\ = 3A i_{d0}^{-3} \{ i_{d0}^2 + \sqrt{B/A} \} \{ i_{d0} + (B/A)^{1/4} \} \\ \{ i_{d0} - (B/A)^{1/4} \} = 0 \quad (12)$$

전체손실 P_{total} 이 최소가 되는 i_{d0-min} 를 구하면 전체손실을 최소로 하는 조건을 구할 수 있다.

$$i_{d0 \text{ min}} = (B/A)^{1/4} \quad (13)$$

Fig. 3은 SynRM을 위한 효율 최적화 제어의 구성도를 나타낸다. 지령속도와 실제속도를 비교한 다음 속도제어기에서 지령토크를 구한다. 속도제어기는 Anti-windup PI 제어기를 사용하였으며 지령토크와 실제속도를 이용하여 효율 최적화 제어 알고리즘을 수행한다. 지령 d , q 축 전류를 구하고 철손을 보상한 다음 i_{ds}^* 와 i_{qs}^* 를 구한다. 좌표변환을 통하여 지령 i_a^* , i_b^* , i_c^* 를 구하여 실제 i_a , i_b , i_c 와 비교하여 HCC

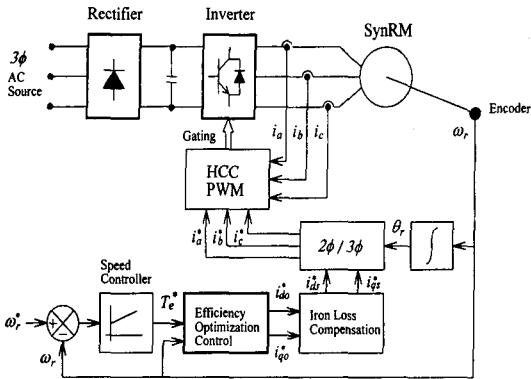


Fig. 3. An efficiency optimization control configuration for SynRM

(Hysteresis Current Control) PWM을 발생시켜 인버터에 펄스를 인가한다. 지령속도에 실제속도가 추종하는 속도제어가 인버터에 가해진 PWM에 의해서 이루어진다.

4. SynRM의 효율 최적화의 결과

Table 1은 3.75[kW] SynRM의 파라미터를 나타낸다.

Fig. 4는 d 축 단자 전류 i_{ds} 의 변화에 대하여 (a)는 전체전류 i_s, i_{qs} (b)는 P_{total} 의 변화를 나타낸다. (a)는 i_{ds} 의 변화에 따라서 i_s 의 최소점이 나타나며 최소 전류조건으로 주어지는 동작점이 존재한다는 것을 알 수 있다. (b)는 i_{ds} 의 변화에 따라 전체 손실이 최소인 점이 나타나고 있다. 따라서 전체 손실이 최소가 되는 점을 찾아 운전을 하면 효율은 최대가 된다. 효율 최적화 제어는 손실이 최소가 나타나는 점을 최적제어로 추적하여 그 동작점에서 운전을 시킨다.

Fig. 5는 지령 d 축 전류를 일정하게 유지하고 철

Table 1. Parameters of 3.75 kW synchronous reluctance motor

정격 용량	3.75[kW]
정격 전압	250[V]
정격 토크	19.8[N · m]
정격 주파수	60[Hz]
극 수	4
고정자 저항 (R_s)	0.238[Ω]
d 축 인덕턴스 (L_d)	43[mH]
q 축 인덕턴스 (L_q)	3.5[mH]
관성계수	0.026[kg · m ²]

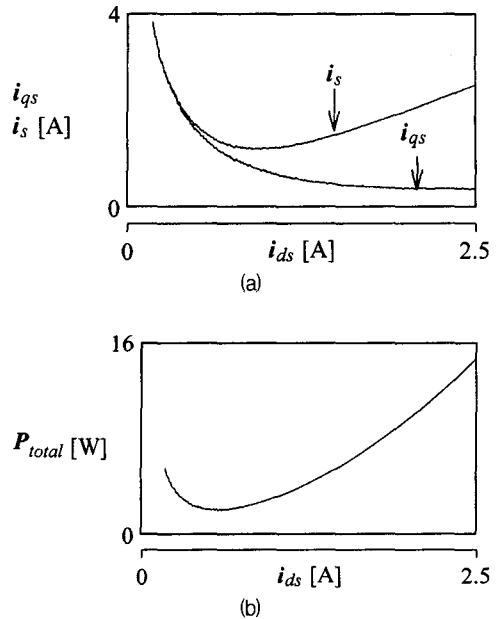


Fig. 4. Variation i_s, i_{qs} and P_{total} for i_{ds}

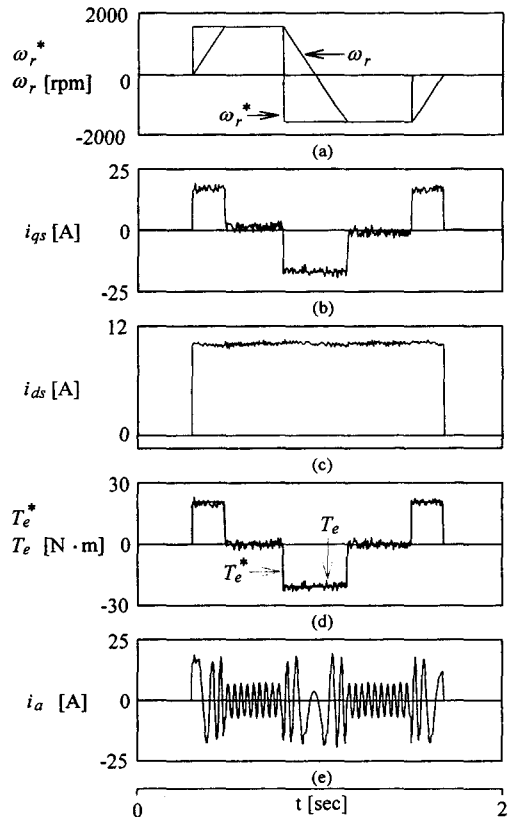


Fig. 5. The response results of constant i_{ds} control

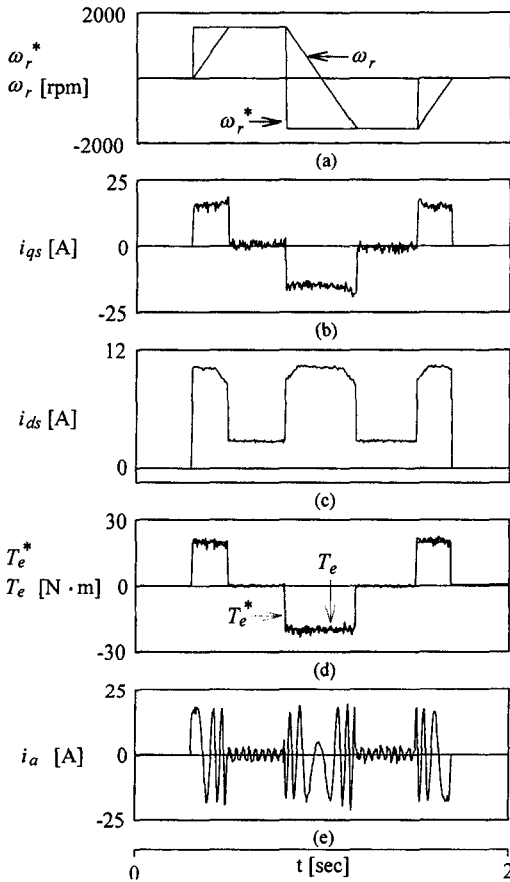


Fig. 6. The response results of efficiency optimization control

손을 보상한 제어에 대한 응답 결과를 나타낸다. Fig. 6은 Fig. 5와 같은 조건에서 본 논문이 제시한 효율 최적화 제어를 위한 d축 전류 제어의 응답 결과를 나타낸다. Fig. 5와 6에서 (a)는 실제속도, (b)는 q축 고정자 전류, (c)는 d축 고정자 전류, (d)는 발생토크 및 (e)는 a상 전류를 나타낸다. Fig. 5에서 d축 전류가 일정하게 제어가 되고 있으며 발생토크는 q축 전류에 의해 제어가 되고 있다. 철손 보상을 위해 i_{ds} 와 i_{qs} 가 정·역회전 속도 변화구간에서 약간의 비선형성을 나타내고 있으며 발생 토크는 속도 제어기에서 발생하는 지령토크를 양호하게 추종하고 있다. Fig. 6은 효율 최적화 제어를 수행하면서도 토크 특성을 그대로 유지하고 있다. i_{ds} 가 효율 최적화를 위해 정상상태에서 낮게 나타나지만 토크의 동특성은 일정하게 유지되고 있다.

Fig. 7은 일정 d축 전류 제어에서 손실의 결과이며 Fig. 8은 본 논문에서 제시한 효율 최적화 제어에

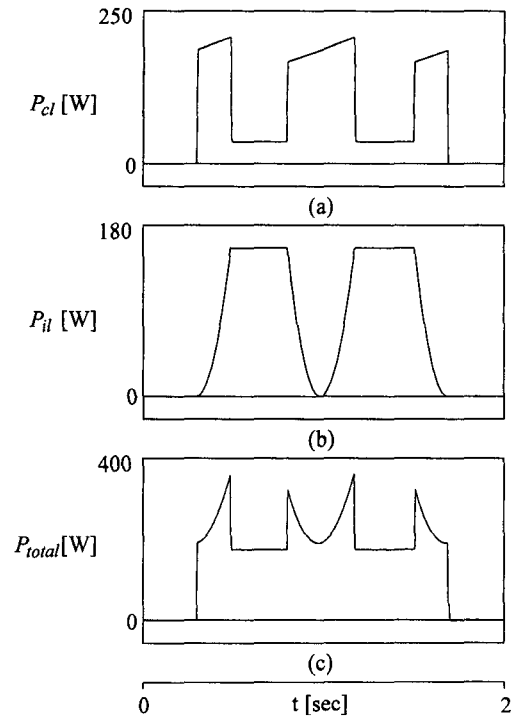


Fig. 7. Loss response of constant i_{ds} control

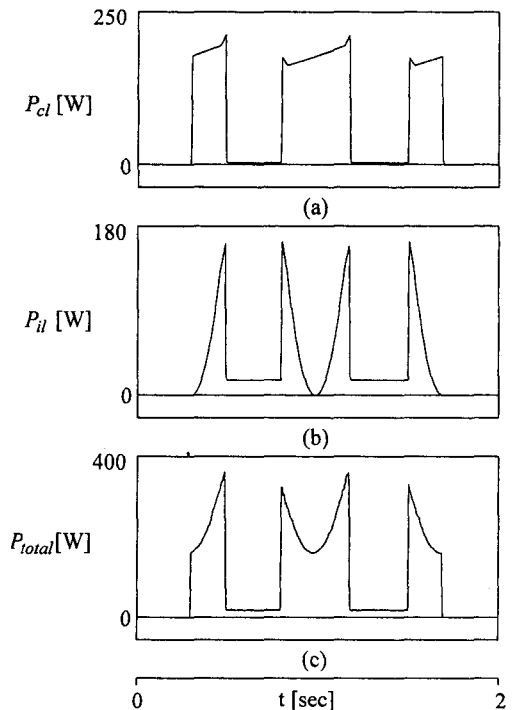


Fig. 8. Loss response of efficiency optimization control

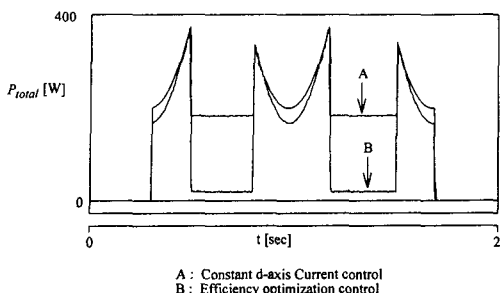


Fig. 9. Loss comparison of the constant d-axis current and the efficiency optimization control

서 손실의 결과이다. Fig. 7과 8에서 (a)는 동손, (b)는 철손 및 (c)는 전체손실을 나타낸다. Fig. 9는 일정 d축 전류 제어와 본 논문에서 제시한 효율 최적화 제어에서 전체 손실을 비교하였다. 그림에서 A는 일정 i_{dk} 제어이며 B는 효율 최적화 제어에서 전체 손실을 나타낸다. 두 경우의 손실을 비교하면 속도가 변동하는 구간에서는 속도제어를 위하여 거의 같은 손실이 발생하지만 정상상태에서는 효율 최적화 제어는 일정 i_{dk} 제어보다 대폭적으로 손실이 감소됨을 알 수 있다. 손실 최소화는 효율 최대화를 이룩할 수 있으므로 본 연구에서 제시한 효율 최적화 제어의 유용성을 검증할 수 있다.

5. 결론

본 논문에서는 SynRM의 고성능 운전을 위하여 손실이 최소가 되는 효율 최적화 제어를 제시하였다. 추정 토크는 동기좌표계에서 전류와 전동기의 파라미터로부터 직접 계산하며 토크 제어기의 출력인 d, q축 전류는 지령 토크를 추종한다. SynRM에서 철손 및 포화에 의해 토크의 비선형성을 해결하기 위하여 철손을 고려한 모델을 대상으로 하였다.

SynRM 드라이브의 정·역회전의 운전을 시켜 전류, 토크, 속도 및 손실의 응답특성을 구하였으며 제시된 알고리즘에서는 간단한 철손 보상 루틴을 첨가하여 철손 때문에 야기되는 토크의 비선형성을 보상하였다. 효율 최적화 제어는 종래의 일정 d축

전류제어와 비교하여 대폭적으로 전체 손실이 감소되었다. 전체 손실의 최소화는 효율의 최대화를 얻을 수 있으며 본 논문에서 제시한 효율 최적화의 타당성을 입증할 수 있었다.

감사의 글 : 이 논문은 2000년도 순천대학교 공과대학 학술재단 연구비에 의하여 연구되었음.

참고문헌

- 1) T. Matsuo and T. A. Lipo, "Field oriented control of synchronous reluctance machine," in Proc. PESC, pp. 425~431, 1993.
- 2) A. Fratta, A. Vagati and F. Villata, "Control of a reluctance synchronous motor for spindle application," in Proc. IPEC-Tokyo, pp. 708~715, 1990.
- 3) R. E. Betz, et al., "Control of synchronous reluctance machines," IEEE Trans. Ind. Appl., Vol. 29, No. 6, pp. 1110~1121, 1993.
- 4) L. Xu and J. Yao, "A compensated vector control scheme of a synchronous reluctance motor considering saturation and iron losses," IEEE Transaction on Industry Applications, Vol. 1A-28, No. 6, pp. 1330~1338, 1992.
- 5) A. Vagati, T. A. Lipo, et al., "Synchronous reluctance motors and drives - A New Alternative," IEEE IAS Annu. Meet. Tutorial Course Note, 1994.
- 6) R. E. Betz, et al., "Control of synchronous reluctance machines," IEEE Trans. on IA, Vol. 29, No. 6, pp. 1110~1121, 1993.
- 7) A. Chiba, M. Pastorelli and G. Franceschini, "High performance control of synchronous reluctance motors," IEEE Trans. on IA, Vol. 28, No. 3, pp. 600~606, 1993.
- 8) R. E. Betz, et al., "Aspects of the control of synchronous reluctance machines including saturation and iron loss," IEEE IAS Annu. Meet., pp. 456~463, 1992.
- 9) J. E. Fletcher, B. W. Williams and T. C. Green, "Efficiency Aspects of Vector Control Applied to Synchronous Reluctance Motors," IEEE IAS Annu. Meet., pp. 294~300, Orlando, Florida, Oct. 1995.