

동기형 릴럭턴스 전동기의 파라미터 측정

윤준보, 김솔, 신정민, 이갑재, 이주
한양대학교 전기공학과

Parameter Measurement of Synchronous Reluctance Motor

Jun-Bo Yun, Sol Kim, Jeong-Min Shin, Kab-Jae Lee, Ju Lee
Dept. of Electrical Eng., Hanyang University

Abstract - As Synchronous Reluctance Motor gives reluctance torque, An inductance is an important parameter that is proportional to torque. To achieve the high performance in sensorless control, it is necessary to consider exact inductance values because the inductance is not a constant parameter anymore. Therefore, this paper shows the inductance measurement using DC current decay test, AC standstill test, and AC standstill test considering Cross Magnetization. This inductance has also been compared with the result that is analyzed by FEM.

표 1. SynRM 모델의 주요사항

항 목	값	단위	항 목	값	단위
정격 입력	220	W	상 수	3	Phase
1차 저항	4.2	[Ω]	회전자 적층길이	50	mm
극 수	4	Poles	공극 길이	0.32	mm

1. 서 론

동기형 릴럭턴스 전동기의 파라미터 중에서 인덕턴스의 값이 전류 및 토오크 특성에 미치는 영향이 매우 크므로 이의 정확한 값의 추출이 요구되어, 이에 대한 해석법 및 측정법이 많이 연구되어 왔다[1]-[3]. 일반적으로 모터의 성능지수인 d , q 축 인덕턴스를 구하는 방법은 여러 가지가 있으나 크게 3가지로 나누어진다.

이상적인 자기회로 모델에서 퍼미언스법으로 인덕턴스를 구하는 해석적인 방법과 유한요소법 또는 등가 자기회로방법과 같은 수치해석적 방법, 그리고 실험에 의한 측정 방법이 있다.

실험에 의한 측정방법은 크게 운전상태시험법과 정지상태시험법으로 나누어 지는데 운전상태시험법에는 대표적으로 P-Q다이아그램의 원선도법이 있고, 정지상태시험법에는 교류 시험법, 직류 시험법, 쇄교자속 시험법등이 있으며, 이런 방법을 이용하여 인덕턴스를 구한다.

일반적으로 d 축 인덕턴스는 d 축 전류에 의한 쇄교자속으로부터 계산하지만, 실질적으로 d 축 인덕턴스는 q 축 전류에 의한 영향도 받게 되는데 이러한 현상을 교차포화(Cross magnetization)라 한다. 동기형 릴럭턴스 전동기는 교차포화 현상을 갖고 있기 때문에 정확한 인덕턴스를 얻기 위해서는 교차포화 효과를 고려하여야 한다.

따라서 본 논문에서는 수치해석적 방법인 유한요소법과 실험에 의한 측정방법인 교류 정지 시험법(AC standstill test), 직류 전류 감소 시험법(DC current decay test), 교차포화를 고려한 교류 시험법으로 인덕턴스를 측정하였고, 그 값을 상호 비교하여 교차포화를 고려한 인덕턴스 측정 결과의 정확도를 검증하였다.

2. 본 론

2.1 유한요소법을 이용한 SynRM 해석

본 논문에서 사용된 동기형 릴럭턴스 전동기의 주요 사양은 표 1과 같고, 그림 1은 유한요소법을 이용하여 해석한 d , q 축의 자속분포도이다. 유한요소법으로 계산된 d , q 축 인덕턴스는 그림 2와 같이 나타난다. d 축 인덕턴스는 1[A]에서 252[mH]이고, 포화되어 감소하기 시작한다. q 축 인덕턴스는 1.5[A] 부근에서 포화되어 거의 일정한 값을 갖는다.

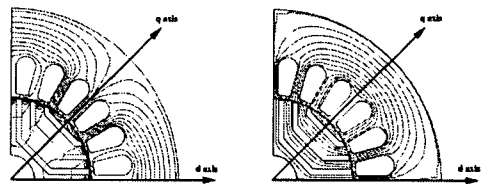


그림 1. d 축, q 축 자속분포

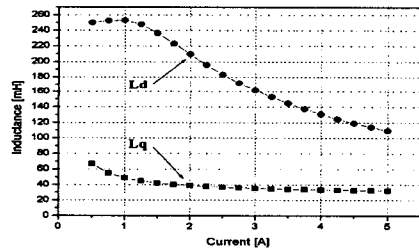


그림 2. 유한요소법에 의해 계산된 d , q 축 인덕턴스

2.2 직류 전류 감소 시험법

직류 전류 감소 시험법은 고정자 a 상에 회전자를 d 축 또는 q 축으로 고정시키고, a 상의 dc 전류가 초기치에서 영(zero)까지 감소하는 것을 측정하여 인덕턴스를 구하는 실험법이다[4]. 이때 철손 성분은 고려하지 않는다.

그림 3에서 T_1 이 꺼졌을 때 초기값 전류 $i_{\omega}(i_{\omega 0})$ 와 식 (1)은 식 (2)로 표현되고, 고정자 저항 R_s 는 직류 전류 감소 시험을 하기전에 측정하여야 한다.

직류 전류 감소 시험법에서 그림 3의 (a)와 같이 회전자를 d 축에 정렬시킨후 초기값 전류로부터 $L_d(i_d)$ 를 구하고, (b)와 같이 회전자를 q 축에 정렬시킨후 같은 방법으로 $L_q(i_q)$ 를 구한다. 그림 4는 직류 전류 감소 시험법으로 측정된 d , q 축 인덕턴스를 나타내고, d 축 인덕턴스 값은 1[A]에서 197[mH]이고, 포화되어 서서히 감소하기 시작한다. q 축 인덕턴스는 1.5[A] 부근에서 포화되어 거의 일정한 값을 갖는다.

$$i_d R_s - V_d = -\frac{d\lambda_d}{dt}; i_q = 0; \lambda_d = L_d(i_d)i_d$$

$$i_d R_s - V_q = -\frac{d\lambda_q}{dt}; i_d = 0; \lambda_q = L_q i_q \quad (1)$$

$$L_d(i_{do}) = \frac{[\int_0^{\infty} \frac{2}{3} V_D(t) dt + R_s \int_0^{\infty} i_d(t) dt]}{i_{ao}}$$

$$L_q(i_{qo}) = \frac{[\int_0^{\infty} \frac{2}{3} V_D(t) dt + R_s \int_0^{\infty} i_q(t) dt]}{i_{ao}} \quad (2)$$

2.3 교류 정지 시험법

교류 정지 시험법은 운전 상태 시험법의 무부하 시험과 같으며, 시험이 매우 간단하여 인덕턴스의 측정에 많이 사용된다[5]. 이 시험법은 그림 5와 같이 전동기 권선의 b, c상을 단락 시킨 상태에서 교류전원을 인가하여 a상 전류, a상 전압, 입력을 측정하여 식 (3)으로부터 인덕턴스를 구한다. 토오크가 영(zero)인 위치를 기준으로 하고, d, q축에 각각 정렬하여 L_d, L_q 를 구한다.

누설 인덕턴스는 회전자를 제거한 후, 모든 상권선을 직렬로 연결하고, 교류 전원을 인가하여 전력분석기로부터 측정되는 데이터로부터 누설 인덕턴스를 구한다. 누설 인덕턴스는 식 (4)를 이용하여 계산할 수 있다.

인덕턴스 측정시 사용된 교류전원의 주파수는 60Hz이며, 측정된 d, q축 인덕턴스는 그림 6과 같이 나타난다. d축 인덕턴스 값은 1[A]에서 220.1[mH]이고, 포화되어 서서히 감소하기 시작한다. q축 인덕턴스는 1.5[A] 부근에서 거의 일정한 값을 갖는다.

$$Q_a = \sqrt{(V_a I_a)^2 - P_a^2}, \quad X_l = \omega L_l = 2\pi f L_l$$

$$E = \sqrt{V_a^2 + (R_s^2 + X_l^2) I_a^2} - 2(R_s P_a + X_l Q_a)$$

$$L_{dq} = L_{dm} + L_l = \frac{E^2}{\omega(Q_a - X_l I_a^2)} + L_l \quad (3)$$

$$L_l = L_{elim} - L_{gelim}, \quad L_{gelim} \approx L_m \cdot \frac{gK}{\tau} \quad (4)$$

$$L_m = \frac{6\mu_0(N_1 K_{al})^2 \tau L_{stack}}{\pi^2 P_1 g K_c (1 + K_s)} = \frac{6\mu_0(N_1 K_{al})^2 \tau L_{stack}}{\pi^2 P_1 g K_c}$$

기호에 대한 설명은 다음과 같다.

- P_a, Q_a, X_l : 유효전력, 무효전력, 누설 리액턴스
- R_s, L_l : b, c상 단락시 선간 저항, 누설 인덕턴스
- L_{dq}, L_{dm} : d, q축 인덕턴스, d, q축 자화 인덕턴스
- V_a, I_a : 인가 상전압, 인가 상전류
- L_{elim} : 회전자가 제거된 후 측정된 인덕턴스
- τ, g, K_c, L : 극간격, 공극, 카터계수, 스택길이
- K_{al}, N_1, P_1 : 권선계수, 턴수, 쌍극수

2.4 교차포화를 고려한 교류 시험법

교차포화를 고려한 교류 시험법은 그림 7과 같이 실험 장치를 구성하고, 이때 회전자는 d축 또는 q축으로 정렬시킨다. d축 인덕턴스를 구할 때 d축에 교류전원, 교차포화를 고려하기 위해 q축에 직류전원을 인가한 후 그에 따르는 전류를 기록하고, 교류전원의 전압을 가변시키면서 전력분석기로부터 나오는 전력정보를 기록한다.

상권선의 저항은 철손저항보다 매우 작으므로 상권선 저항을 무시하면, 식 (5)와 같이 계산할 수 있다. 식 (5)에 의하여 d축 인덕턴스를 계산할 수 있고, 회전자를 전기각으로 90°회전시키거나, 직류전원과 교류전원을 교환한 후 인덕턴스를 계산하고 측정하면, q축 인덕턴스를 구할 수 있다.

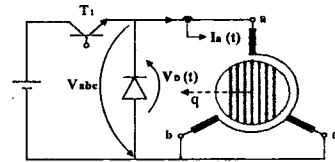
누설 인덕턴스는 교류 정지 시험법에서 사용한 방법과 동일한 방법으로 누설 인덕턴스를 구하였다. 이때 교류

전원의 주파수는 교류 정지 시험법과 마찬가지로 상용주파수 60Hz이며, 교차포화를 고려하기 위해 i_b 는 0[A]~3[A]까지 0.25[A]씩 증가시키며 실험을 하였다. 그림 8은 교차효과를 고려한 d, q축 인덕턴스를 나타내고, i_b 를 점점 증가시킬수록 인덕턴스 값이 떨어지는 것을 볼 수 있다.

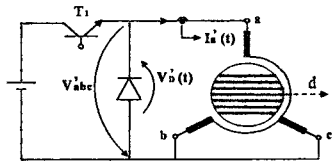
$$R_{core} = \frac{V^2}{P_1}, \quad L_{core} = \frac{V}{R_{core}}, \quad \omega_1 L_d = \frac{V^2}{Q_1}, \quad i_a = \frac{V}{\omega_1 L_d}$$

$$i_d = \frac{2}{3} i_a, \quad i_q = \frac{2}{3} \left(\frac{\sqrt{3}}{2} i_b - \frac{\sqrt{3}}{2} i_c \right) = \frac{1}{\sqrt{3}} (2i_b) = \frac{2}{\sqrt{3}} i_b$$

$$L_{dm}(i_d, i_q) = \frac{2}{3} [L_d(i_d, i_q) - L_l] \quad (5)$$



(a)



(b)

그림 3. 직류 전류 감소 시험법

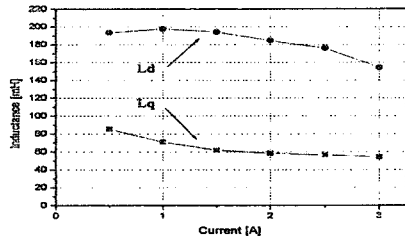


그림 4. 직류 전류 감소 시험법에 의한 d, q축 인덕턴스

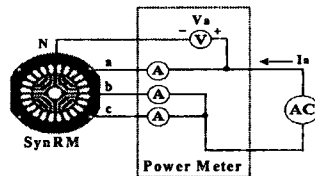


그림 5. 교류 정지 시험법

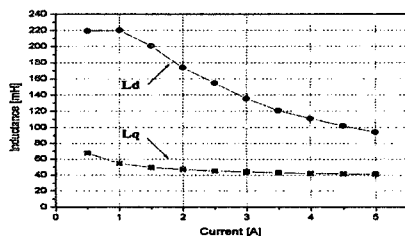


그림 6. 교류 정지 시험법에 의한 d, q축 인덕턴스

2.5 측정된 d , q 축 인덕턴스 결과 비교

3가지 시험법으로 측정된 인덕턴스와 유한요소법을 이용하여 계산된 인덕턴스를 비교하면 그림 9와 같다.

작은 전류에서는 자기포화가 일어나지 않으므로 d 축 인덕턴스는 작은값을 갖고, q 축 인덕턴스는 립의 포화현상이 발생하지 않아 큰 값을 가지는 것을 볼 수 있다. 유한요소법으로 계산된 d 축 인덕턴스는 시험법으로 측정된 인덕턴스보다 큰 값을 갖는데 실험시 인가전압의 왜곡과 철손에 의한 영향을 고려하지 못하였기 때문이다.

교차포화를 고려한 교류 시험법(q 축 전류가 영일때)과 교류 정지 시험법으로 측정된 인덕턴스 차이는 교류 정지 시험법은 3상 전체에 전압을 인가하는 반면 교차포화를 고려한 교류 시험법은 한 상만을 여자시키기 때문이다.

직류 전류 감소 시험법으로 측정된 인덕턴스는 회전자에 교류전원 인가시 발생하는 철손이 고려되지 않아 교류 시험법의 값과 큰 차이를 보인다.

그림 10은 SynRM의 성능지수인 인덕턴스 차($Ld-Lq$)와 인덕턴스비(Ld/Lq)를 나타낸 그림이다. 그림 10(a)에서 보는바와 같이 직류 전류 감소 시험법을 제외한 나머지 1[A] 부근에서 인덕턴스의 차가 최대가 되고, 그림 10(b)에서는 1~2[A]사이의 전류에서 인덕턴스의 비가 최대가 되기 때문에 최대 토오크를 얻을 수 있음을 알 수 있다.

3. 결 론

본 논문에서는 SynRM의 쇄교자속이나 토오크 추정시 직접적인 영향을 주는 인덕턴스 량을 직류 전류 감소 시험법, 교류 정지 시험법, 교차포화를 고려한 교류 시험법 등의 측정방법을 정리하고, 그 인덕턴스 량을 측정하였다.

특히 Cageless SynRM은 별도의 제어기 없이는 운전할 수 없으므로 제작된 전동기만의 자체 성능을 평가하기 위해서는 정확한 인덕턴스 량의 측정이 요구되므로, 교차포화를 고려한 교류 시험법을 이용하여 성능을 검증하는 것이 타당하다고 사료된다. 또한 센서리스 제어와 같이 전동기 정수가 제어기 성능에 영향을 미치는 경우도 보다 정확한 전동기 정수를 이용함으로써, 성능 향상을 꾀할 수 있을 것으로 예상된다.

감사의 글

본 연구는 산업자원부 대학 전력 연구센터 육성 지원 사업에 의한 지원으로 수행되었습니다.

[참 고 문 헌]

- [1] V. B. Honsinger, The inductance L_d and L_q of reluctance machines, IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, vol. PAS-90, no. 1, pp. 298-304, 1971.
- [2] E. A. Klingshirn, DC standstill torque used to measure L_q of reluctance and synchronous machines, IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, vol. PAS-97, no. 5, pp. 1862-1869, 1978.
- [3] A. Kilthau, Measurement of the Parameters of the Synchronous Reluctance Machine including Cross Saturation, EPE 2001
- [4] I. Boldea, Reluctance Synchronous Machines and Drives, Oxford university Press Inc., New York, 1996.
- [5] 김정철, "철손과 자기포화를 고려한 동기 릴럭턴스 전동기의 최대효율 제어," 한양대학교, 1999.

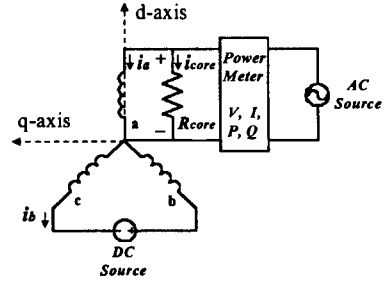


그림 7. 교차포화를 고려한 교류 시험법

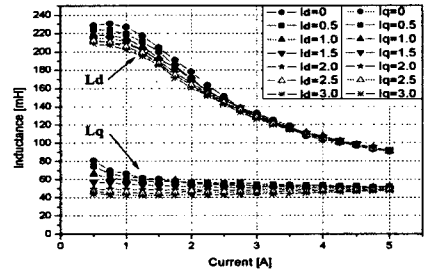


그림 8. 교차효과를 고려한 d , q 축 인덕턴스

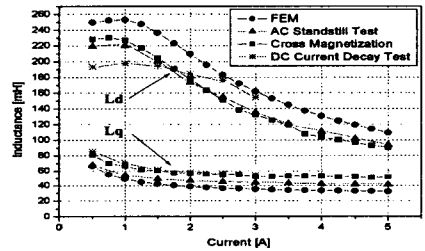
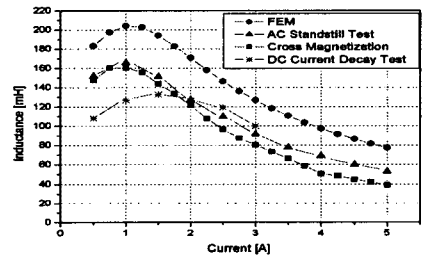
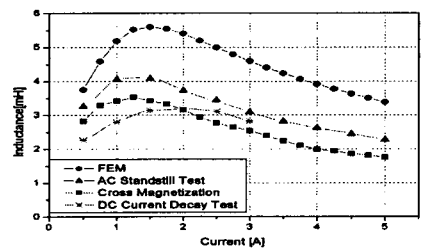


그림 9. d , q 축 인덕턴스 비교



(a) L_d-L_q



(b) L_d/L_q

그림 10. L_d-L_q 및 L_d/L_q 비교