

매입형 영구자석 동기전동기의 인덕턴스 측정법 비교 분석

논문
58-5-9

A Comparative Analysis of Test Methods of Measuring d- and q- Axes Inductances for Interior Permanent Magnet Synchronous Motor

김 승 주* · 김 철 진** · 이 주*
(Seung-Joo Kim · Cherl-Jin Kim · Ju Lee)

Abstract - The performance analysis and robust control of the interior permanent magnet synchronous motor (IPMSM) greatly depend on accurate value of its parameters. To achieve the high performance of torque control, it is necessary to consider exact inductance values because the inductances are nonlinear parameters of operating the IPMSM. Therefore many different methods have been performed for analysis of the methodology for the exact measurement of synchronous inductances. None of them is considered standard, and accuracy levels of all these methods are also not consistent. Among these experimental methods, the DC current decay test and the vector current control test are ideal for a laboratory environment. In this paper, these two test methods are compared by applying inductances to the IPMSM. The paper analyzes the measured inductances of the two methods and their differences with inductances obtained from the finite element method(FEM).

Key Words : Interior permanent magnet synchronous motor, IPMSM, Inductance, L_d , L_q , Parameter measurement

1. 서 론

매입형 영구자석 동기 전동기(Interior Permanent Magnet Synchronous Motor : 이하 IPMSM)의 정상상태 성능 분석과 고성능 제어는 전동기 파라미터의 정확한 측정 및 추정 에 의해 크게 좌우된다. IPMSM은 상 인덕턴스가 회전자 위치에 따라 변화하는 구조적 특징 때문에 상 인덕턴스를 전동기의 구동주파수에 동기하여 시불변 값으로 나타내는 것이 모터의 제어에 있어서 필수적이다. 따라서 상 인덕턴스를 등가적으로 d-축과 q-축으로 나누어 측정하여 그 값을 전동기 제어를 위해 사용한다. IPMSM의 파라미터 중에서 인덕턴스 값이 전류 및 토크 특성에 미치는 영향이 매우 크므로 이의 정확한 값의 추출이 요구되어, 이에 대한 해석법 및 측정법이 많이 연구되고 있다.

IPMSM의 3가지 필수 파라미터들은 영구자석의 쇄교자속과 d-와 q-축의 인덕턴스이다. d-와 q-축의 인덕턴스 추정은 포화에 의한 영향이 있으므로 매우 주의 깊은 접근이 필요하다[1]. 일반적으로, 전동기의 중요 파라미터인 d-와 q-축 인덕턴스를 구하는 방법은 여러 가지가 있으나 크게 유한요소법과 실험에 의한 측정 방법 2가지로 나눌 수 있다. 유한요소법의 경우, 전동기의 포화를 고려하여 인덕턴스 값을 추정할 수 있다. 또한, 유한요소법에 의한 추정은 설계시

성능예측에 사용된다. 유한요소법은 전동기의 구조와 치수 값을 알아야 함은 필수적이며, 추정된 값들은 실험적으로 측정된 값들에 의해 확인 할 필요가 있다[2].

인덕턴스 측정 시험법은 크게 정지상태 시험법과 운전상태 시험법으로 나눌 수 있다. 우선, 정지상태 시험법에는 직류전류감소 시험법, 교류정지 시험법 등이 있으며, 직류시험법은 고정자의 임의의 상에 회전자를 d-축 또는 q-축으로 고정시키고 상전류를 인가한 후, 전원부와 차단시켜 상 전류 값이 0으로 감소하는 것을 측정하여 인덕턴스 값을 측정하는 시험법이다[3]. 교류시험법은 시험 방법이 간단하여 인덕턴스 측정에 많이 사용되는 방법이지만, 이 방법 역시 정지 시 IPMSM의 인덕턴스를 측정한 것이므로 회전시 인덕턴스 값과는 차이가 있을 수 있다. 그리고 운전상태 시험법에는 발전시험법 및 벡터전류제어 시험법 등이 있다. 발전시험법은 벡터제어 인버터가 필요없이 다이내모 미터를 이용하여 IPMSM의 회전자를 회전시켜 출력되는 역기전력을 이용하여 인덕턴스를 측정하는 방법이다. 벡터전류제어 시험법은 실험실에서 수행하기 쉬운 시험법으로 IPMSM의 벡터제어 운전시 사용하는 장비 외에 어떤 추가적인 장비도 필요하지 않다는 장점이 있다[4]. 또한, 전류 제어시 제어각에 따른 d-와 q-축 인덕턴스의 값들을 모두 추출할 수 있기 때문에 IPMSM의 고성능 운전이 가능하다.

본 논문은 IPMSM에 적용한 직류전류감소 시험법의 d-축 인덕턴스 측정방법이 동기형 릴럭턴스 전동기(Synchronous Reluctance Motor : 이하 SynRM)에서의 직류전류감소 시험법과는 다르게 측정하여야 됨을 제안하고, 벡터전류제어 시험법과 직류전류감소 시험법으로 측정된 d-와 q-축 인덕턴스와 유한요소법을 이용하여 계산한 인덕턴스의 측정결과를 비교분석한다.

† 교신저자, 정희원 : 한양대 전기공학과 부교수 · 공박

E-mail : julee@hanyang.ac.kr

* 정희원 : 한양대 전기공학과 박사과정

** 정희원 : 한양대 제어계측공학과 교수 · 공박

접수일자 : 2008년 12월 22일

완료일자 : 2009년 3월 26일

2. IPMSM의 구조 및 수학적 모델링

전기각속도 ω 인 동기속도로 회전하는 d-와 q-축 좌표계로 변환시킨 IPMSM의 전압방정식은 식 (1)과 같다.

$$\begin{bmatrix} v_d \\ v_q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R_s + pL_d & -\omega L_q \\ \omega L_d & R_s + pL_q \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_d \\ i_q \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ \omega \Psi_a \end{bmatrix} \quad (1)$$

- 여기서, v_d, v_q : 전기자 전압의 d-와 q-축 성분
- i_d, i_q : 전기자 전류의 d-와 q-축 성분
- R_s : 전기자 권선 저항
- L_d : d-축 인덕턴스
- L_q : q-축 인덕턴스
- Ψ_a : 영구자석에 의한 전기자 쇄교자속
- p : 미분연산자

식 (1)에서 우측의 첫 번째 파트의 행렬식은 전기자 권선 저항 및 d-와 q-축 인덕턴스에 의한 전압강하 성분이며, 두 번째 파트는 영구자석의 전기자 쇄교자속에 의한 역기전력 성분을 나타내고 q-축으로 작용됨을 알 수 있다.

IPMSM의 발생 토크는 영구자석에 의한 마그네틱 토크와 인덕턴스차(또는 돌극차)에 의한 릴럭턴스 토크를 모두 갖고 있다. IPMSM의 토크에 대한 수학적 모델링은 전류 벡터 \vec{i}_a 와 전기자 쇄교자속 벡터 $\vec{\Psi}_a$ 의 외적으로 구하면 식 (2)로 유도된다.

$$T = P_n \Psi_a i_q + P_n (L_d - L_q) i_d i_q \quad (2)$$

여기서, P_n : 극쌍수

식 (2)의 우측 제 1항은 영구자석에 의한 마그네틱 토크를 나타내고, 제 2항은 돌극성에 의해 발생하는 릴럭턴스 토크를 나타낸다. IPMSM은 $L_d < L_q$ 의 역돌극성이 존재하므로, 음의 d-축 전류가 인가되어야 양의 릴럭턴스 토크를 얻게 된다. 그러나 음의 d-축 전류에 의해 d-축 전기자 반작용 자속이 영구자석을 감자시키는 방향으로 작용하므로 영구자석의 불가역 감자에 대하여 주의해야 한다.

그림 1는 고정자 권선 전류에 의한 d-와 q-축의 자로를 나타낸다. IPMSM의 d-축 자로는 철심, 자석, 공극 그리고 고정자 철심으로 이루어져 있으며, q-축 자로는 철심과 공극 그리고 고정자 철심으로만 이루어져 있다. 이러한 자로 구성과 기계적인 형상은 전자기적으로는 현저한 차이가 있다. 일반적으로 페라이트나 회로용 계통의 영구자석의 투자율은 공극과 거의 같으므로 영구자석을 공극과 같이 생각할 수 있다.

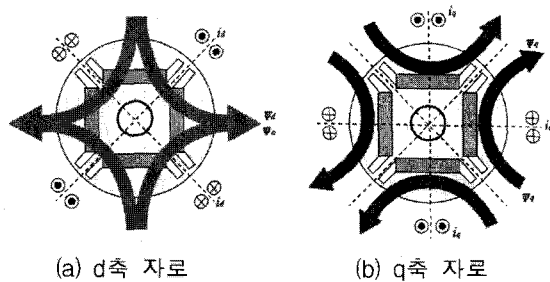


그림 1 고정자 권선 전류에 의한 d-와 q-축 자로
Fig. 1 d- and q-axes flux path due to stator winding current

IPMSM은 영구자석이 회전자 내부에 매입되어 있어 회전자 표면의 기계적인 구조는 대칭이지만, 자기적으로는 q-축과 달리 d-축은 영구자석에 의한 공극이 d-축 자로에 있는 것과 같게 된다. 그러므로 자석을 통과하지 않는 q-축 자로에 비해 d-축 자로의 릴럭턴스가 크므로 q-축의 인덕턴스가 d-축 인덕턴스보다 크게 된다. 이러한 돌극 효과는 회전자의 영구자석에 의한 토크 외에 IPMSM의 특징인 릴럭턴스 차에 의한 토크가 존재하므로 이를 적절히 이용하면 영구자석에 의한 토크보다 큰 토크를 얻을 수 있으며, 속도-출력 특성을 개선할 수 있다[5].

3. d-와 q-축 인덕턴스 측정

3.1 유한요소법

유한요소법은 전동기 파라미터들을 예측하고 추정하기 위해 매우 유용한 도구이다. 유한요소법은 또한 전동기 내부의 포화와 누설을 관찰할 수 있다. d-와 q-축 인덕턴스는 그림 2(a)에 나타난 정상시의 자속벡터도와 그림 2(b)에서의 쇄교자속 파형으로부터 위상차 α 를 구하고 이를 이용하여 다음과 같은 순서로 구할 수 있다[6].

- ① 모터단자를 개방하고, 부하측으로부터 모터를 구동한 상태를 가정하여 유한요소법으로 회전자를 회전시켜, u상 권선에 쇄교하는 자속의 변화를 계산한다.
- ② 모터에 전류를 흘린 상태로 가정하고, 계산할 인덕턴스에 대한 전류값 I_0 를 임의의 전류위상각 β 로 입력한다. ①과 같은 방법으로 회전자를 회전시키고 u상 권선에 쇄교하는 자속의 변화를 계산한다.
- ③ ①, ②로부터 얻어진 파형의 기본파성분의 실효값 ψ_{u0} , $\psi_{u\alpha}$ 및 위상차 α 를 계산한다.
- ④ ③에서 얻어진 값으로부터 식 (3)~(8)을 이용하여 d-와 q-축의 인덕턴스를 산출한다.

유한요소법에서는 두 d-와 q-축 전류가 존재하기 때문에 인덕턴스들은 식 (7)과 식 (8)에 나타난 것과 같이 두 축 전류의 함수로 고려되어진다.

$$i_d = -I_a \sin \beta \quad (3)$$

$$i_q = I_a \cos \beta \quad (4)$$

$$\Psi_a = \sqrt{3} \Psi_{u\alpha} \quad (5)$$

$$\Psi_o = \sqrt{3} \Psi_{u0} \quad (6)$$

$$L_d = \frac{\Psi_o \cos \alpha - \Psi_a}{i_d} \quad (7)$$

$$L_q = \frac{\Psi_o \sin \alpha}{i_q} \quad (8)$$

- 여기서, β : 전류위상각
- Ψ_a : 무통전상태의 쇄교자속
- $\Psi_{u\alpha}$: 무통전상태시 u상 전기자 쇄교자속의 실효값
- Ψ_o : 통전상태의 쇄교자속
- Ψ_{u0} : 통전상태시 u상 전기자 쇄교자속의 실효값
- α : Ψ_a 와 Ψ_o 의 위상차

그림 2(b)에 나타난 것처럼 u상의 무통전 상태의 쇄교자

속 파형이 통전상태의 쇄교자속 파형보다 크기가 작고, 통전 상태의 파형이 무통전 상태의 파형보다 정현적이다. 이 방법으로 계산한 d-와 q-축 인덕턴스는 코어의 자속밀도가 높아져서 포화영역에 근접하게 되면 저하되는 경향이 있기 때문에 실무하시의 전류값을 수식에 대입하여 d-와 q축 인덕턴스를 구하는 것이 보다 실제적이다.

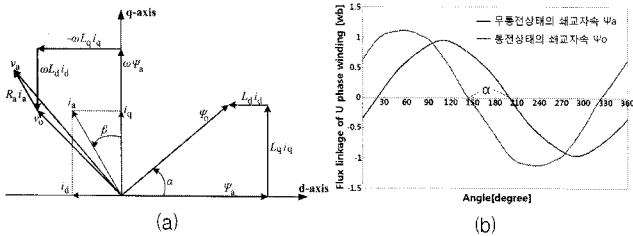


그림 2 (a) IPMSM의 벡터도 (b) u상의 쇄교자속 파형
Fig. 2 (a) Vector diagram of IPMSM (b) Flux linkage waveform of phase u

3.2 벡터전류제어 시험법

벡터전류제어 시험법은 표면자석형 동기 전동기(Surface Mounted Permanent Magnet Synchronous Motor : 이하 SPMSM), SynRM, IPMSM 등의 전동기를 구동하는 인버터 시스템에 적합한 방법이다[4]. 벡터전류제어 시험법의 장점은 전류제어를 하는 IPMSM에 대하여 어떠한 추가적인 설치가 필요없이 수행 될 수 있는 것이며, 벡터전류제어 IPMSM의 블록도는 그림 3과 같다. 인버터의 PWM 스위칭 신호들은 지령전류 크기와 전류위상각 β 로부터 유도하며, 전류위상각 β 는 그림 2(a)에서 보인 것처럼 전류 페이저와 q-축 사이의 각도이다. 실험과정동안 전동기 속도는 정격 속도(45rpm)에서 수행되고, 전압과 전류들은 IPMSM의 단자들에서 측정한다.

인덕턴스들은 정상상태의 d-와 q-축 전압과 전류 및 쇄교자속 수식을 사용하여 계산한다. 따라서 인덕턴스는 전압 방정식으로부터 식 (9)과 식 (10)으로 계산할 수 있으며, 모는 측정은 일정한 속도(45rpm)과 일정한 전류를 인가한 상태로 측정되므로 전압방정식의 미분항은 무시할 수 있다.

$$L_d(i_d, i_q) = \frac{V_d - R_s i_d - \omega \Psi_a}{\omega i_d} \tag{9}$$

$$L_q(i_d, i_q) = \frac{V_q - R_s i_q}{-\omega i_q} \tag{10}$$

식 (9)과 식 (10)은 고차의 고조파가 없는 기본파 성분에서만 유효한 수식이며, 식 (11)과 식 (12)는 직류전류감소 시험법의 d-또는 q-축을 고정하여 측정한 인덕턴스 L_d 와 L_q 의 측정결과와 비교하기 위한 수식이다. 즉, 직류전류감소 시험법에서의 d-축 인덕턴스는 벡터제어시 전류위상각 90° ($i_q = 0$)의 식 (11)로 계산한 인덕턴스와 비교하고, 직류전류감소 시험의 q-축 인덕턴스는 벡터제어시 전류위상각 0° ($i_d = 0$)의 식 (12)로 계산한 인덕턴스와 비교한다.

$$L_d = \left. \frac{V_q - \omega \Psi_a}{\omega i_d} \right|_{i_q=0} \tag{11}$$

$$L_q = \left. \frac{V_d}{-\omega i_q} \right|_{i_d=0} \tag{12}$$

PWM 인버터를 사용하면 IPMSM의 인덕턴스를 간단히 계산할 수 있으며, 전 운전영역에서의 인덕턴스 측정이 가능하다. 그러나 PWM 인버터는 데드타임 및 전력회로 소자에서의 전압강하에 의한 오차가 존재하고, PWM 인버터의 출력전압에 고조파가 많이 포함되게 된다. 그러므로 기본파 성분을 추출하기 위해 FFT알고리즘이 측정된 전압과 전류에 적용되고, 이와 같은 계산을 위해선 영구자석에 의한 쇄교자속은 일정하고 두 축 사이에 상호 포화는 인덕턴스에 영향을 안준다는 가정이 전제되어야 한다.

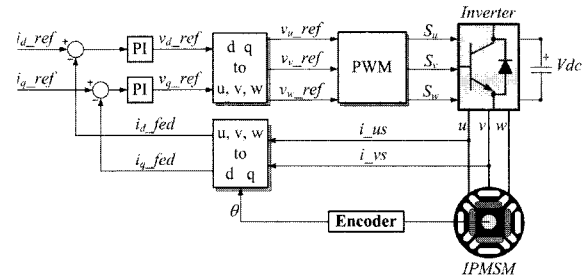


그림 3 벡터전류제어 시험법의 블록도
Fig. 3 Diagram of Vector Current Control Test

3.3 직류전류감소 시험법

직류전류감소 시험법은 고정자 u상에 회전자를 d-또는 q-축으로 고정시키고, u상의 직류전류가 초기치에서 영(zero)까지 감소하는 것을 측정하여 인덕턴스를 구하는 실험법이며, 직류전류감소 시험법은 철손 성분을 고려하지 못한다[3]. IPMSM의 직류전류감소 시험을 위한 회로 구성은 그림 4와 같으며, 그림 4의 (a)와 같이 회전자의 N극을 d축에 정렬시킨 후 d-축 인덕턴스를 구하고, (b)와 같이 회전자를 d축에 대해 전기각으로 90° 돌려서 q축에 정렬시킨 후 같은 방법으로 q-축 인덕턴스를 구한다.

인덕턴스는 식 (15)과 식 (16)으로 표현되고, 전기자 권선 저항 R_s 는 직류전류감소 시험을 하기 전에 측정한다.

$$i_d R_s - V_d = -\frac{dL_d i_d}{dt}; i_q = 0 \tag{13}$$

$$i_q R_s - V_q = -\frac{dL_q i_q}{dt}; i_d = 0 \tag{14}$$

$$L_d = \frac{[\int_0^\infty \frac{2}{3} V_D(t) dt + R_s \int_0^\infty i_u(t) dt]}{i_{u0}} \tag{15}$$

$$L_q = \frac{[\int_0^\infty \frac{2}{3} V_D(t) dt + R_s \int_0^\infty i'_u(t) dt]}{i'_{u0}} \tag{16}$$

- 여기서, V_D : d-축 정렬시 다이오드 양단 전압
- V_D : q-축 정렬시 다이오드 양단 전압
- i_u : d-축 정렬시 직류 감소 전류
- i'_u : q-축 정렬시 직류 감소 전류
- i_{u0} : d-축 정렬시 초기 전류
- i'_{u0} : q-축 정렬시 초기 전류

기존에 SynRM을 측정하기 위한 직류전류감소 시험법[3]으로 d-축을 정렬하여 IPMSM에 그대로 적용할 경우, 스위치 T_1 이 on상태가 되면 회전자의 S극이 u상과 정렬하게 된

다. 이것은 그림 4(a)에 나타난 것과 같이 회전자의 N극이 u상과 정렬되어 측정되는 것과는 극성이 반대가 됨을 의미하며, S극으로 정렬시 측정된 d-축 인덕턴스가 N극으로 정렬시 인덕턴스보다 작게 나타나게 된다. 이런 현상은 기존의 측정법으로 전류를 인가하여 u상과 S극이 정렬하면 영구자석의 포화방향으로 전류에 의한 자속이 합쳐져서 나타나기 때문에 전류당 쇄교자속의 변화량이 전체적으로 작아짐을 알 수 있다. 그러므로 IPMSM의 직류전류감소 시험법은 u상에 전류를 인가하여 d-축과 회전자의 S극이 정렬을 마친 후, 회전자를 전기각으로 180° 회전시켜줌으로써 u상과 회전자의 N극이 정렬되게 하여 회전자를 고정시킨 후 인덕턴스를 측정해야 된다. 이것은 d-축 전류가 음의 방향으로 흘러야 되는 IPMSM 운전 특성을 고려하여 d-축 인덕턴스를 측정해야 함을 의미한다. 즉, 본 논문에서 제시한 IPMSM의 직류전류감소 시험법은 SynRM의 직류전류감소 시험법과 달리 d-축 인덕턴스 측정시 회전자에 매입된 영구자석의 방향성을 고려하여 인덕턴스를 측정한다.

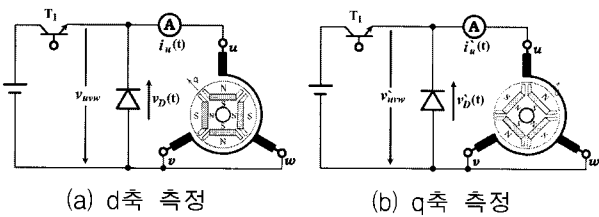


그림 4 직류전류감소 시험법
Fig. 4 DC current decay test at standstill

4. 실험 및 분석

4.1 실험

제작된 IPMSM의 d-와 q-축 인덕턴스들은 3장에서 설명한 두 시험 방법들을 사용하여 비교분석하고, 두 시험 방법으로부터 얻어진 인덕턴스들을 규명하기 위하여 전동기의 유한요소 모델이 사용된다. 표 1은 본 논문에서 d-와 q-축 인덕턴스 측정에 사용된 IPMSM의 제원을 나타낸다.

벡터전류제어 시험법은 그림 3과 같이 구성하여 수행되고, 전류제어시 회로 구성을 그대로 사용하여 측정할 수 있다. 측정된 전압과 전류의 기본파 성분은 FFT 알고리즘에 의해 추출하고 회전자 기준 축의 d-q변환은 기본파 성분들에 적용된다. 그리고 인덕턴스는 여러 전류 크기에 대해 식 (11)과 식 (12)으로 계산된다. 그림 5는 IPMSM의 회전속도가 45[rpm]에서의 역기전력파형과 회전자의 위치각(전기각)을 나타낸다. 그림 6은 벡터전류제어 시험법에서의 측정된 전압과 전류 파형을 회전자의 위치각에 대하여 보여준다. 그림 6의 측정된 전압과 전류 파형은 d-와 q-축 인덕턴스를 구하기 위해 FFT 알고리즘을 적용하여 기본파 성분의 전압과 전류 파형으로 변환한다.

직류전류감소 시험법은 그림 4와 같이 회로를 구성하여 수행한다. 이 시험법은 회전자의 0°와 90°(전기각) 두 위치에서의 전압과 전류를 측정하여 d-와 q-축 인덕턴스를 식 (15)과 식 (16)으로부터 계산한다. 그림 7(a)는 식 (15)과 식 (16)에 적용된 전압과 전류 파형의 한 예로써 전류 0.5A에

서 측정된 값이다. 그림 7(b)는 u상과 회전자의 영구자석이 N극으로 정렬할 때와 S극으로 정렬할 때의 d-축 인덕턴스를 나타낸다. 3.3절에 언급한 것과 같이 S극 정렬시 d-축 인덕턴스가 N극 정렬시 인덕턴스보다 전체적으로 약 0.15[H]만큼 작다. 이것은 벡터전류제어 시험법과 유한요소법으로 구한 d-축 인덕턴스를 비교하였을 때 IPMSM의 직류전류감소 시험은 영구자석의 극성을 N극으로 정렬하여 수행해야 됨을 알 수 있으며, IPMSM의 운전특성을 고려한 올바른 측정은 회전자의 N극이 u상과 정렬된 측정방법을 적용해야 됨을 의미한다.

4.1 d-와 q-축 인덕턴스 분석

본 장에서는 위에서 언급한 시험법들로부터 얻어진 결과를 비교 분석한다. 그림 8(a)와 (b)는 두 시험법과 유한요소법으로부터 얻어진 전류에 따른 d-와 q-축 인덕턴스의 변화를 보여준다. 실험에 사용된 IPMSM의 경우 d-축 포화에 의한 영향이 미미하다. 결과적으로 전류에 따른 d-축 인덕턴스의 변화는 대체로 일정하다. d-축 자속은 또한 고정자 슬롯 리브에 대해 영향을 받지 않고 회전자 구조에 대해 작은 오차를 가진다. 따라서 벡터전류제어 시험으로부터 얻어진 값들은 유한요소법으로 얻어진 값들을 따라감을 알 수 있고 반면에 직류전류감소 시험법의 값들은 낮은 전류에서 차이를 보임을 알 수 있다. 유한요소법의 경우 d-와 q-축 여자각 동시에 나타나며, 벡터전류제어 시험에서 전류위상각 β 는 0° 또는 90°로 유지한다면 d-와 q-축 전류에 의한 상호 포화가 없다고 할 수 있다. 마찬가지로, 직류전류감소 시험법에서 d-와 q-축 전류 모두는 인덕턴스를 측정할 때 상호 포화가 존재하지 못한다. 그러므로 d-와 q-축 전류에 의한 상호 포화를 고려한 인덕턴스 측정은 벡터제어 시험에서 전류위상각 β 를 변화시키면서 수행된다.

벡터전류제어 시험법과 유한요소법은 전체 전류 범위에 걸쳐서 d-축 인덕턴스가 거의 일정하다. 이것은 회전자 구조에서 리브(rib)의 포화현상으로 설명될 수 있다. 리브들은 자속 배리어의 측면에 위치한다. 일반적으로 리브들은 두 근접한 자석 극들 사이에 누설자속에 의해 전체적으로 포화된다고 가정한다. 이러한 경우, d-축 자속을 통하는 전류의 영향은 극히 작고, 일정한 d-축 인덕턴스 값은 전류 변화에 대해서 나타난다. 회전자 구조에서 리브가 자석의 누설 자속 하나에 의해 전체적으로 포화되지는 않으며, 작은 d-축 전류가 리브들을 포화시킬 수는 없다.

다른 한편으로, q-축 전류 여자시 리브의 포화는 누설 자속에 의해 생기며, q-축 인덕턴스가 전류의 증가에 따라 급격하게 작아지는 경향은 q-축 자속 경로가 q-축 전류에 의해 생긴 자속에 의해 포화가 쉽게 일어나기 때문이다. 즉, q-축 전류의 증가는 q-축 자로를 포화시켜 전류당 q-축에서 발생하는 쇄교자속량의 변화가 작아짐으로써 그림 8(b)에 보여진 것처럼 q-축 인덕턴스가 현저히 감소하는 현상을 보인다.

그림 9는 상호 연결된 d-와 q-축 전류의 변화에 따른 각각의 d-와 q-축 인덕턴스를 보여준다. 이 결과는 유한요소법으로 계산된 상호 연결된 d-와 q-축 전류의 변화에 따른 인덕턴스와 비슷한 양상을 보임을 알 수 있다.

그림 10은 정격전류 3.5[A]를 인가하고 전류위상각을 10°에서 80°까지 10°씩 증가시켰을 때의 인덕턴스 변화를 보여준다. 전류위상각 10~20° 부근에서 d축 인덕턴스가 높게 형성되다가 전류위상각 30~80° 부근에서 거의 일정하게 유지하는 것을 설명하기 위해서는 식 (9)을 보면 알 수 있듯이 전류위상각이 변화하면 d-와 q-축 전류가 동시에 존재하기 때문에 q-축 전압, q-축 전류가 전기자 권선 저항에 흐를 때의 전압, 영구자석에 의한 속도기전력, 각속도 ω 와 d-축 전류의 곱의 항을 모두 고려해야 한다. 본 실험에 사용된 IPMSM의 경우, 전류위상각이 작을 때는 식 (9)의 분자 항의 값이 분모 항의 값보다 상대적으로 크게 변화함을 유추할 수 있으며, 전류위상각이 30° 이상으로 증가하면 분자와 분모의 비가 거의 일정하게 유지됨으로써 그림 10과 같은 그래프 특성을 보인다고 할 수 있다. 그리고 전류위상각에 따른 q-축 인덕턴스 경향은 식 (10)에 의해 유추할 수 있으며, 큰 변화폭을 갖는 d-축 인덕턴스와 달리 q-축 인덕턴스는 거의 변화가 없음을 알 수 있다.

표 1 IPMSM의 제원

Table 1 Specifications of IPMSM

항목	사양 [단위]
Number of Pole	8
Number of Slot	12
Rated Voltage	190[V]
Rated Current	3.5[A]
Rated Torque	20.0[Nm]
Rated Speed	45[rpm]
Phase Resistance	7.7[Ohm]

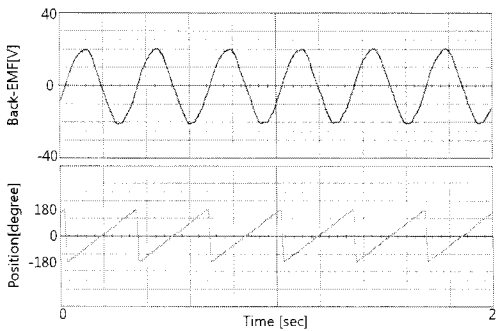


그림 5 IPMSM의 역기전력 파형(정격속도 45rpm)

Fig. 5 Back-EMF of IPMSM at 45rpm

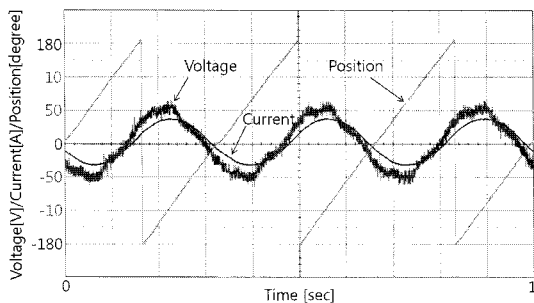


그림 6 측정된 전압과 전류 파형

Fig. 6 Measured Voltage and Current Waveform

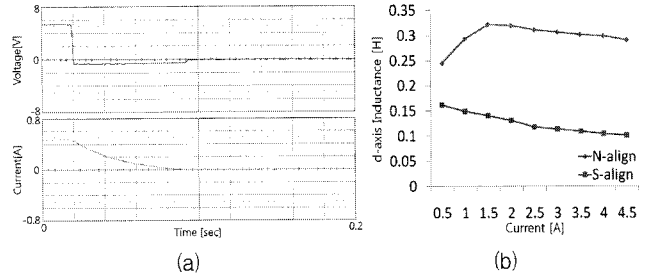


그림 7 직류전류감소 시험법 (a) 전압과 전류 파형 (b)회전자의 N극과 S극의 d-축 정렬에 따른 d-축 인덕턴스의 변화

Fig. 7 (a) Voltage and Current (b) Variation of d-axis inductance with N- and S-align in the DC current decay test

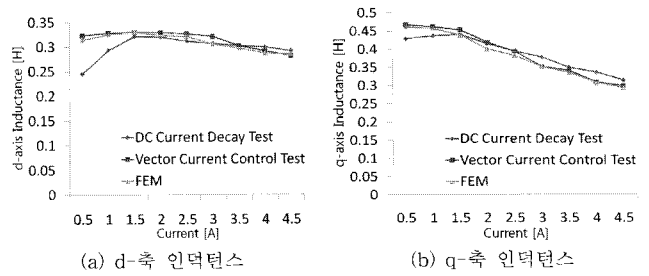
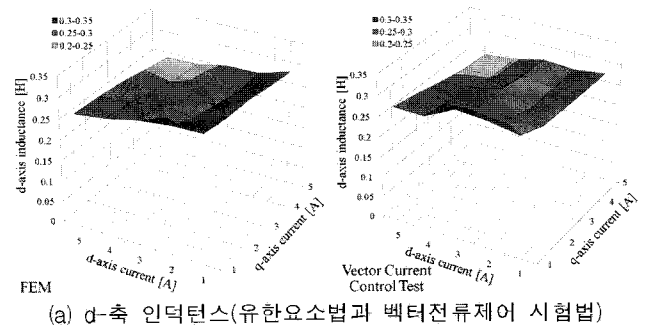
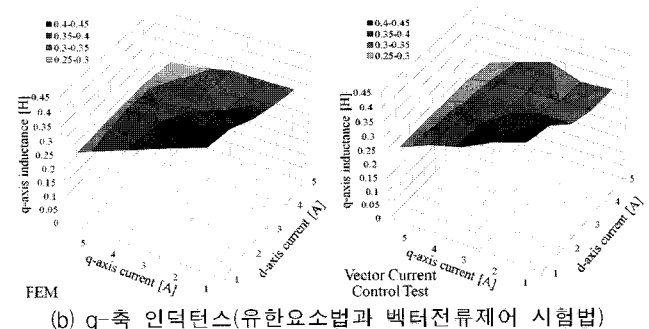


그림 8 전류에 따른 인덕턴스의 변화

Fig. 8 Variation of d-and q-axes inductances with currents



(a) d-축 인덕턴스(유한요소법과 벡터전류제어 시험법)



(b) q-축 인덕턴스(유한요소법과 벡터전류제어 시험법)

그림 9 상호 연결된 d-와 q-축 전류의 영향에 따른 d-와 q-축 인덕턴스의 변화

Fig. 9 Effect of cross coupling current over (a) d-axis inductance (b) q-axis inductance

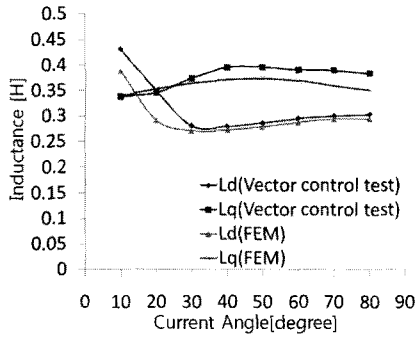


그림 10 전류위상각에 따른 d-와 q-축 인덕턴스의 변화
 Fig. 10 Variation of d- and q-axes inductances with current angle

5. 결 론

본 논문에서는 IPMSM의 d-와 q-축 인덕턴스 측정을 위한 2가지 시험 방법에 대해 분석하고, 측정된 인덕턴스들은 유한요소법에 의해 비교분석하였다. 벡터전류제어 시험법은 전류위상각에 따른 d-와 q-축 인덕턴스를 측정할 수 있으며 상호 포화를 고려할 수 있다. 그리고 추가적인 장치가 필요 없이 벡터제어에 사용하는 인버터를 그대로 사용할 수 있는 장점이 있지만, PWM 인버터를 사용하면 출력전압에 고조파가 많이 존재하여 출력전압의 기본과 성분을 추출하기가 어려워 FFT 알고리즘을 써서 데이터를 처리해야하는 번거로움이 있다. 벡터전류제어로 측정된 d-와 q-축 인덕턴스는 유한요소법에서 계산된 인덕턴스와 비교적 비슷한 양상을 보였다.

그리고 본 논문에서 제안한 IPMSM의 직류전류감소 시험법은 SynRM의 직류전류감소 시험법과 달리 d-축 인덕턴스 측정시 회전자에 매입된 영구자석의 방향성을 고려하여 인덕턴스를 측정해야 됨을 측정결과를 통하여 입증하였으며, 직류전류감소 시험법으로 측정된 d-와 q-축 인덕턴스는 벡터전류제어 시험법과 유한요소법의 결과와 비교하였다. 그 결과 직류전류감소 시험법으로 측정된 q-축 인덕턴스의 크기는 벡터전류제어 시험법과 유한요소법의 q-축 인덕턴스와 비슷한 양상을 보였으며, d-축 인덕턴스는 d-축 전류가 작을 때 벡터전류제어 시험법의 결과와 약간의 차이를 보임을 알 수 있는데, 이것은 정지시험법의 단점 중 하나인 철손이 고려되지 못한 점이 하나의 원인일 것으로 사료된다.

참 고 문 헌

[1] R. Dutta and M. F. Rahman, "A Comparative Analysis of Two Test Methods of Measuring d- and q-Axes Inductances of Interior Permanent-Magnet Machine," IEEE Trans. Magn., vol. 42, no. 11, pp. 3712-3718, Nov. 2006.
 [2] G. Kang, J. Hong, G. Kim, and J. Park, "Improved parameter modeling of interior permanent magnet synchronous motor based on finite element analysis," IEEE Trans. Magn., vol. 36, no. 4, pp. 1867-1870, Jul. 2000.

[3] I. Boldea, "Reluctance Synchronous Machines and Drives," Oxford university Press Inc., New York, pp. 83~84, 1996.
 [4] K. M. Rahman and S. Hiti, "Identification of machine parameters of a synchronous motor," in Industry Applications Conf. 38th IAS Annu. Meeting, vol. 1, Oct. 12-16, 2003, pp. 409-415.
 [5] 김장목, "매입형 영구자석 동기전동기의 제어특성 개선," 서울대학교 대학원 전기공학부 공학 박사학위 논문, 1996.
 [6] 武田洋次, 平沙多賀男, "PM 모터의 dq 등가회로 등價回路定數の測定法," 電氣學會論文誌D, Vol. 113, No.11, pp.1330-1331, 1993.

저 자 소 개



김승주 (金承柱)
 1978년 7월 6일생. 2001년 한라대 전기공학과 졸업. 2006년 한양대 대학원 전기공학과 졸업(석사). 2007년~현재 동 대학원 박사과정
 Tel : 02-2220-0349
 E-mail : w3ksj@hanmail.net



김철진 (金澈珍)
 1980년 한양대 전기공학과 졸업. 1983년 동 대학원 전기공학과 졸업(석사). 1991년 동 대학원 전기공학과 졸업(공학박사). 1991년~1995년 생산기술연구원, KETI 제어기기 연구실장. 1995년~현재 한라대학교 교수. 2003년~현재 당학회 이사, 평의원.
 Tel : 033-760-1245
 E-mail : cjkim@halla.ac.kr



이주 (李柱)
 1963년 8월 30일생. 1986년 한양대 전기공학과 졸업. 1988년 동 대학원 전기공학과 졸업(석사). 1988년~1993년 국방과학연구소 연구원. 1997년 일본 큐슈대학교 SYSTEM 정보과학연구과 졸업(공학박사). 1997년 한국철도기술연구원 선임연구원. 1997년~현재 한양대 공대 전기제어생체공학부 부교수
 Tel : 02-2220-0342
 E-mail : julee@hanyang.ac.kr