

파라미터 가변을 고려한 매입형 영구자석 동기전동기의 특성해석

論 文

49B-7-3

Characteristic Analysis of Interior Permanent Magnet Synchronous Motor Considering Parameters Variation

姜圭洪* · 洪正杓** · 金奎卓***

(Gyu-Hong Kang · Jung-Pyo Hong · Gyu-Tak Kim)

Abstract - This paper presents an investigation of the parameter modeling on the basis of Finite Element (FE) analysis in which the variable frequency characteristic in field weakening is considered in Interior Permanent Magnet Synchronous Motors (IPMSM). The parameters of IPMSM have nonlinear characteristics not only in accordance with the load variation but also with the current phase angle of a system fed inverter. From the results of FE analysis, the performances of torque and speed-power are simulated and the validity of the proposed FE analysis is compared with experimental results.

Key Words : IPMSM, FE, current phase angle

1. 서 론

영구자석 전동기는 단위 중량 당 출력비와 효율이 높아 추진시스템이나 압축기의 구동원으로 적용되고 있다. 매입형 영구자석 전동기(Interior Permanent Magnet Synchronous Motor : IPMSM)는 회전자의 돌극성에 의해 릴럭턴스 토크(Reluctance Torque)가 부가적으로 발생하므로 단위 전류 당 토크가 높아 현재 많은 연구가 이루어지고 있다. 매입형 영구자석 동기전동기의 토크 특성 및 약계자 운전(Field Weakening operation)에 의한 속도-출력 특성을 정확하게 예측하기 위해서는 공극에서의 쇄교자속과 직축 및 횡축(d-q axis) 인덕턴스의 정밀한 산정이 요구되어진다 [1].

영구자석 전동기의 일반적인 파라미터 산정방법은 d축과 q축 각각의 자기회로를 구성하여 퍼미언스로부터 파라미터를 산정하는 집중정수법(Lumped parameter method)이 주로 사용되어지고 있다 [2,3]. 이러한 방법은 계산이 빠르고 용이하기 때문에 특성 해석 및 제어 시스템의 설계에 자주 이용된다. 그러나 매입형 영구자석 전동기의 파라미터는 회전자의 구조에 의해 부하조건과 가변속 운전을 위한 구동 특성에 따라 비선형적으로 변한다. 특히, 전기자동차 구동용 IPMSM은 공급 전원의 한계와 부하 조건 및 운전 영역 변동이 매우 커 d-q축 인덕턴스 (L_d, L_q)는 비선형적으로 극심한 변동이 발생하므로 집중정수법에서는 이를 고려할 수 없다 [4,5].

이러한 한계를 극복하기 위해서 전기계의 수치해석적인 방

법으로 유한요소 해석(Finite Element Analysis : FEA)이 주로 적용되어지고 있다 [5,6]. IPMSM은 자속의 누설을 최소화하기 위해서 구조적으로 국부적인 포화가 발생하도록 설계한다. 또한, 포화 영역에서의 포화 정도는 부하의 변동에 따라 달라지므로 인덕턴스도 크게 변화한다 [7]. 인버터 구동 시스템에서 일정 전압으로 속도-출력 영역을 확장하기 위해서는 약계자 운전이 요구되어진다. 약계자 운전을 위해서 영구자석에 의한 자극의 중심과 전류에 의한 자극 중심의 상대적 위상을 변경하는 전류 위상각을 변경한다. 이러한 전류 위상각의 변경은 부하조건에 의한 인덕턴스의 변화 특성과 같이 비선형적인 변화를 발생한다.

따라서, 본 논문에서는 d-q축 인덕턴스와 쇄교자속의 상호관계에 의한 IPMSM의 정출력 영역을 분석하고 부하조건 및 운전 특성을 고려하여 IPMSM의 정밀한 파라미터 산정 및 특성해석을 수행하였다 [4-6]. 유한요소 해석으로부터 d-q축 인덕턴스를 산정하기 위해서 에너지 중첩법을 적용하였으며 약계자 운전을 위한 전류 위상각 변화를 고려하였다. 해석 결과를 실험으로부터 검증하여 해석의 타당성을 입증하였다.

2. 파라미터와 속도-출력 특성

IPMSM의 속도-출력특성은 d-q축 인덕턴스와 영구자석에 의한 쇄교자속등의 회로정수와 전류의 크기에 의해 결정되어진다. 따라서 가변속 특성을 만족하는 IPMSM를 설계하기 위해서는 파라미터와 IPMSM의 특성과의 관계를 파악해야한다. 그림 1은 전류 벡터궤적에서 단위 전류당 최대토크 및 속도 증가를 위한 전압-전류제한 궤적을 나타내었다 [8,9].

IPMSM의 출력 및 유기기전력은 다음과 같다.

$$P = m\omega [\phi_f i_q + (L_d - L_q) i_q i_d] \quad (1)$$

* 正 會 員 : 昌原大 電氣工學科 博士課程

** 正 會 員 : 昌原大 電氣工學科 助教授 · 工博

*** 正 會 員 : 昌原大 電氣工學科 副教授 · 工博

接受日字 : 1999年 12月 28日

最終完了 : 2000年 4月 19日

$$E = \omega [\psi_f i_q + L_d i_d] \quad (2)$$

여기서 m 은 상수이고 ω 전기적 각 주파수, ψ_f 는 영구자석에 의한 쇄교자속이다. 일정전압에서 속도 증가를 위한 약계자 운전 영역에서 전압의 제한 조건은 다음과 같다 [9].

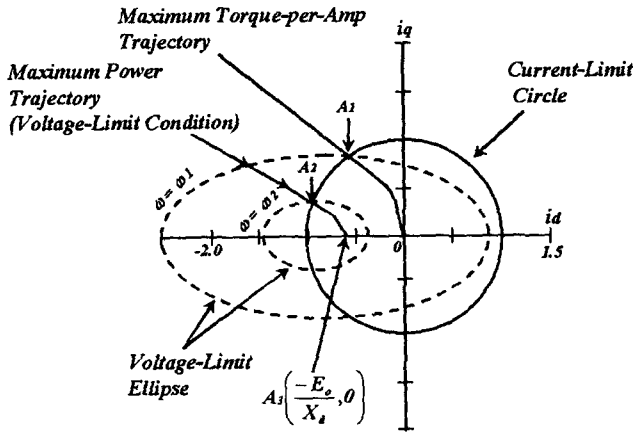


그림 1 d-q축상에서 IPMSM의 전류 벡터제어
Fig. 1 Scheme of current vector control on d-q plan

$$v_d = \omega L_q i_q \quad (3)$$

$$v_q = \omega [\psi_f + L_d i_d] \quad (4)$$

$$v_a = \sqrt{(v_d^2 + v_q^2)} = v_{Lim} \quad (5)$$

여기서, v_{Lim} 은 최대 공급 전압이다.

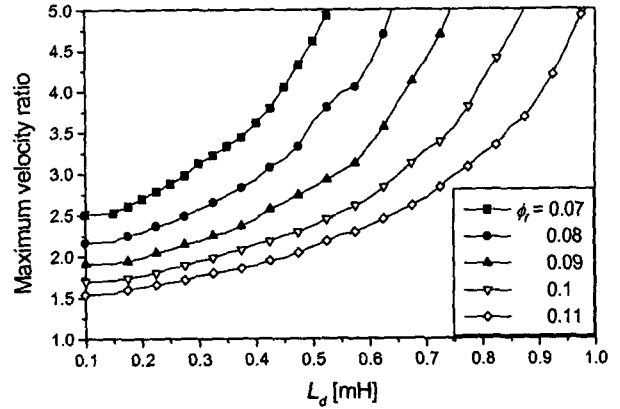
IPMSM의 정출력 영역은 회로정수 ψ_f 와 L_d , L_q 및 돌극비 (L_q/L_d)의 상호 관계에 의해서 결정되어진다. 따라서 파라미터들의 관계로부터 정출력 영역을 분석하기 위해 해석 모델의 기본 사양을 표 1에 나타내었다. 돌극비는 2로 선정하여 해석하였다.

표 1 해석 모델의 사양

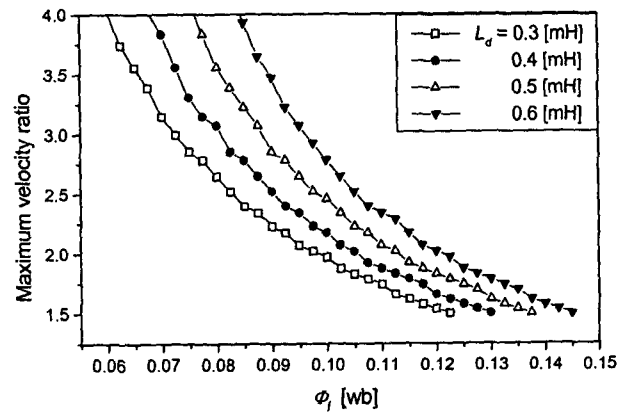
Table 1 Specification of analysis model

정격 출력	15 [kW]	기저 속도	3000 [rpm]
상 전압	98 [V]	돌극비	2
정격 전류	85 [A]		

쇄교자속 ψ_f 와 d축 인덕턴스 L_d 와의 관계로부터 15[kW]의 출력 특성을 만족하는 정출력 영역의 최대 속도비 (최대속도/기저속도)를 그림 2에 나타내었다. ψ_f 가 증가할수록 최대 속도비는 줄어드는 반면 d축 인덕턴스 L_d 가 증가할수록 속도비는 증가한다. 따라서 속도 및 출력 특성을 만족하는 IPMSM의 정밀한 설계를 위해서 ψ_f 와 L_d 의 관계에 따른 정출력 영역의 범위를 그림 3에 나타내었다. 이러한 특성은 돌극비의 변화에 따라서도 달라지게 된다.



(a) L_d 의 변화에 따른 정출력 영역의 최대속도비



(b) ψ_f 의 변화에 따른 정출력 영역의 최대속도비

그림 2 L_d 와 ψ_f 에 따른 정출력 영역의 속도비

Fig. 2 Velocity ratio in constant power region according to L_d , ψ_f

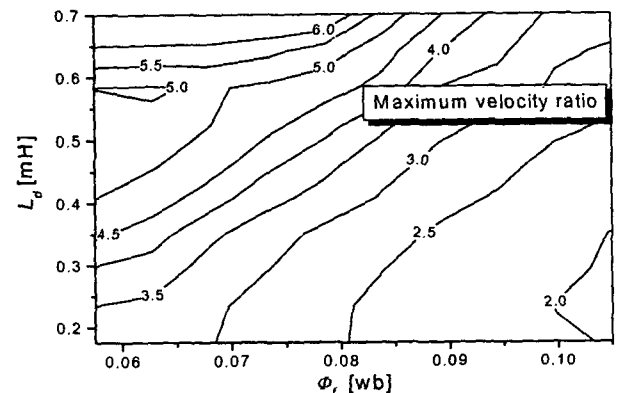


그림 3 파라미터 관계에 의한 정출력 영역의 최대속도비

Fig. 3 Velocity ratio in constant power region according to parameter

3. 전류 벡터제어를 고려한 인덕턴스 산정

3.1 유한요소 해석에 의한 인덕턴스 산정

IPMSM은 파라미터에 따라 특성이 크게 변하므로 파라미

터의 산정이 매우 중요하다. 특히 IPMSM은 구조적으로 포화 영역을 가지므로 부하 변동 및 전기자 권선에 의한 자속의 위상이 변화에 따라 파라미터 변동은 극심하게 나타난다. 따라서 본 논문에서는 포화를 고려하여 비선형 해석이 가능한 유한요소법(Finite Element Method : FEM)을 이용하여 IPMSM의 파라미터를 산정하였다 [5,6].

맥스웰의 전자방정식으로부터 유한요소 해석을 위한 지배 방정식은 다음과 같다.

$$-\frac{1}{\mu_0} \nabla^2 \mathbf{A} = \mathbf{J} + \nabla \times \mathbf{M} \quad (6)$$

여기서 \mathbf{A} 는 벡터 포텐셜, \mathbf{J} 는 여자전류밀도 그리고 \mathbf{M} 은 자화벡터이다.

영구자석에 의한 쇄교자속 λ 는 각각의 권선 단면에 대한 평균 벡터 포텐셜로부터 계산할 수 있다.

$$\lambda = \left[\iint_{S1} A_1 dS / S1 - \iint_{S2} A_2 dS / S2 \right] l \quad (7)$$

여기서 l 은 적층길이 그리고 $S1$ 과 $S2$ 는 권선의 총 면적을 나타낸다.

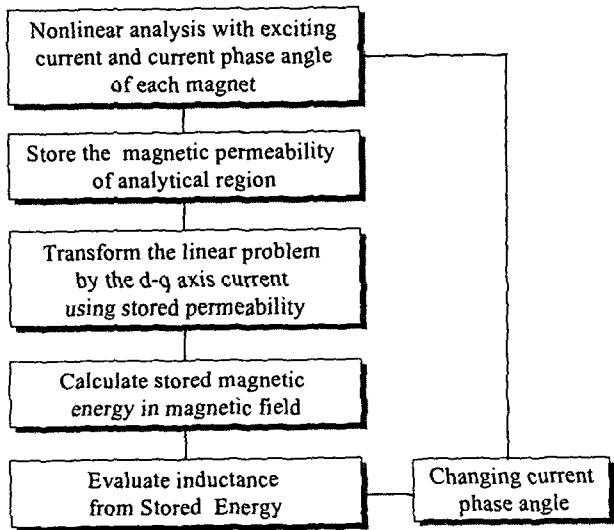


그림 4 전류 위상각을 고려한 d-q축 인덕턴스 산정 과정
Fig. 4 Calculation process of d-q axis inductance considering current phase angle

인버터 구동 IPMSM은 전류 위상각을 변경하여 정출력 영역을 확장한다. IPMSM은 회전자의 구조적인 특징에 의하여 전류의 크기 및 전류 위상각에 따라 포화의 정도가 변하므로 파라미터 변동이 수반하게 된다 [7]. 따라서 전류 위상각 변화에 따른 파라미터의 변동을 정밀하게 분석해야 한다. 그림 4는 전류 위상각 및 전류의 크기를 고려하여 유한요소 해석으로부터 인덕턴스를 산정하는 과정을 나타내었다.

3.2 해석 결과

유한요소 해석 결과 d축 자속의 경로는 선형 특성을 가지지만 q축의 자속은 자석간의 단락을 방지하기 위하여 구성한

magnetic barrier의 포화의 정도에 따라 크게 변동하고 d축과 q축의 자속의 경로에 의해 자기저항의 차가 발생함을 알 수 있다. 인버터 구동 IPMSM에서 magnetic barrier의 포화 정도는 전류의 크기 및 전류 위상각에 따라 크게 변화한다. 유한요소 해석으로부터 d축과 q축 전류에 의한 등 포텐셜 분포도를 그림 5에 나타내었다.

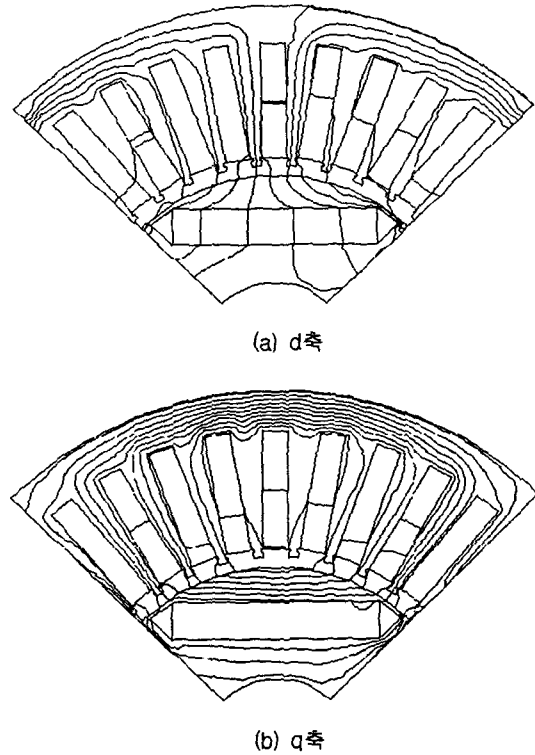


그림 5 등 포텐셜 분포도
Fig. 5 Equi-potential distribution

전류 위상각의 변화를 고려되지 않은 경우 d-q축 인덕턴스는 전류의 크기에 따라 변화하는 특성을 그림 6에 나타내었다. d축 인덕턴스는 자기저항이 매우 커 전류의 크기에 따라 큰 변화가 없는 반면 q축 인덕턴스는 전류의 크기에 따라 극심하게 변화함을 알 수 있다.

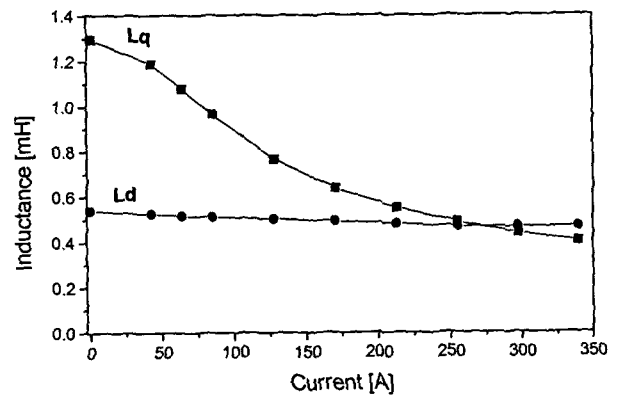


그림 6 부하 변동에 따른 d-q축 인덕턴스
Fig. 6 d-q Axis inductance according to load variation

일정 전류에서 약계자 운전을 위하여 전류 위상각을 변경하는 경우 인덕턴스의 변화가 발생한다. 그림 7은 전류 크기 및 위상각의 변화에 따른 인덕턴스의 변화를 나타내었다. d축 인덕턴스는 전류의 크기 및 위상각에 따라 큰 변화가 없지만 q축 인덕턴스는 전류의 크기 및 위상각에 따라 극심하게 변화함을 알 수 있다. 이러한 전류 위상각에 따른 인덕턴스의 변화는 IPMSM의 토크 특성 및 속도-출력 영역이 인덕턴스에 따라 변화한다는 사실을 알 수 있다.

따라서 부하변동 및 정출력 영역이 넓은 용도에 적용하는 IPMSM의 특성을 정밀하게 해석하기 위해서는 운전 부하 및 속도에 따라 파라미터의 정확한 산정이 요구된다.

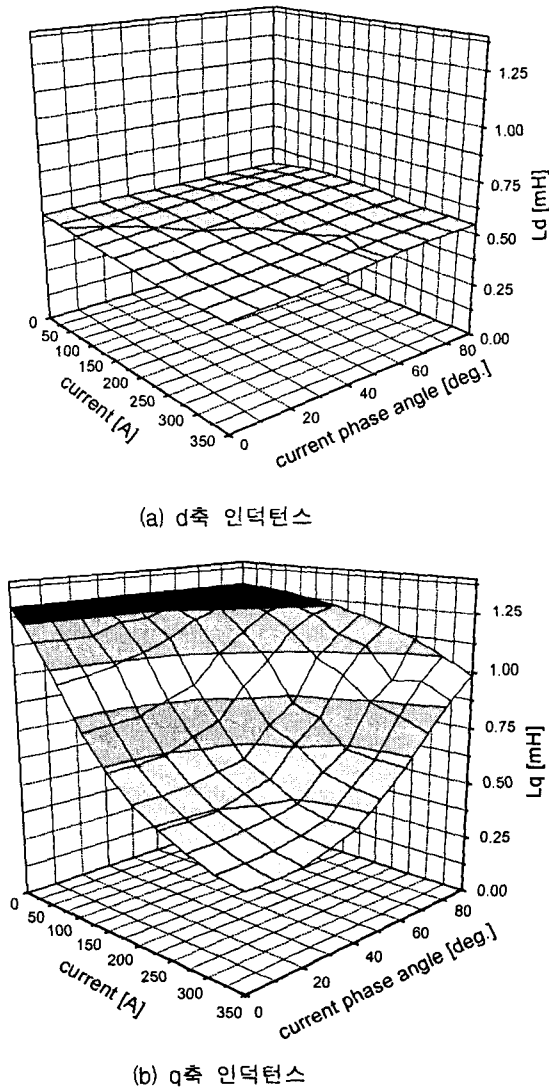


그림 7 부하 및 전류위상각 변화에 따른 d-q축 인덕턴스
Fig. 7 d-q Axis inductance by changing of load and current phase angle

4. 실험에 의한 인덕턴스 산출

유한요소 해석으로부터 산정한 인덕턴스를 실험 결과와 비교하여 해석의 타당성을 검증하였다. 그림 8은 시작기로 제작된 IPMSM의 고정자 및 회전자 구조를 나타낸다.

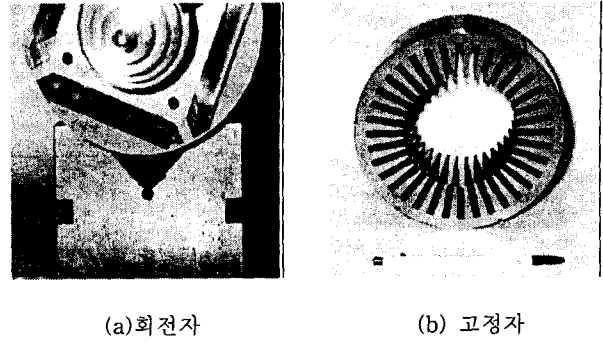


그림 8 IPMSM의 구조
Fig. 8 Structure of IPMSM

본 논문에서 제작한 시작기는 정격전류가 85[A]이며 정격 부하의 400[%]까지 구동하는 전동기로서 정격부하에서의 인덕턴스를 측정해야 한다. 그러나 운전 상태에서 인덕턴스를 직접 측정하기는 어렵다. 따라서 본 논문에서는 IPMSM의 d-q축 벡터도를 이용하여 간접적인 방법으로 인덕턴스를 측정하였다. 그림 9는 IPMSM의 d-q축 벡터도를 나타내었다.

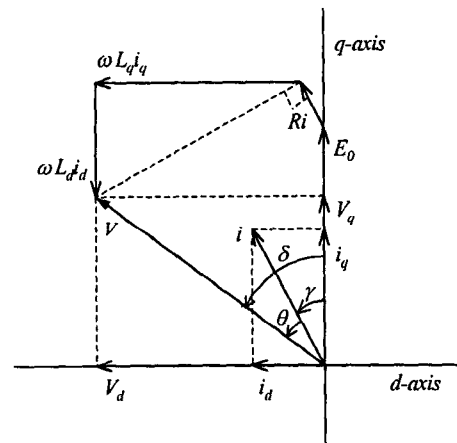


그림 9 IPMSM의 벡터도
Fig. 9 Vector diagram of IPMSM

여기서 δ 은 부하각이고 θ 는 역률각이다.

인버터에서 전류 위상각 γ 를 제어하여 i_d 와 i_q 를 결정하고 V_d, V_q 는 상전압의 역률각으로부터 산정하였다. 식 (3)과 식 (4)은 정격 부하조건에서 간접적인 방법에 의해 L_d 와 L_q 를 계산하는 것을 보여준다 [10].

$$L_d(\gamma) = \frac{E_0 + Ri_q - V_q}{\omega i_d} \quad (8)$$

$$L_q(\gamma) = \frac{V_d - Ri_d}{\omega i_q} \quad (9)$$

여기서 E_0 는 운전상태를 고려하여 일정한 온도상태에서 무부하 역기전력을 측정된 결과를 이용하였다.

그림 10에서는 속도에 따른 무부하 역기전력을 유한요소

해석의 결과와 비교하였다. 해석결과와 실험치가 거의 일치함을 알 수 있다. 정격전류를 인가한 상태에서 인덕턴스 산정을 위한 실험 data를 표 2에, d-q축 인덕턴스를 그림 11에 나타내었다. d축 인덕턴스는 전류 위상각 변화에 따라 거의 변화가 없는 반면 q축 인덕턴스는 큰 변화가 발생한다. 실험 결과 전류위상각이 낮은 영역에서는 해석치와 실험치가 거의 일치하는 반면 전류 위상각이 증가함에 따라 다소 약간의 차이가 발생한다. 이는 상온(25°C)에서의 무부하 역기전력 실험 결과를 이용하여 간접적인 방법으로 인덕턴스를 산정한 결과로써 정격부하에서 전류 위상각을 증가시키면서 실험한 결과 전동기 온도 상승에 의해 영구자석의 자속밀도는 감소한다. 이러한 온도 상승에 의한 자속의 저하를 유기기전력의 감소로 보정하여 d축 인덕턴스를 산정하였다. 그러나 매입형 영구자석 전동기의 경우 영구자석이 회전자 철심에 매입되어 있는 구조로 고정자 권선의 온도상승에 의한 영구자석의 온도 상승분을 정량적으로 정확하게 평가하기는 어렵다. 따라서 전류위상각이 증가할수록 전동기의 운전 시간은 증가하여 영구자석의 온도가 변화되어 인덕턴스는 해석치와 실험치가 다소 차이가 발생한 결과이다.

인덕턴스 변화를 고려한 토크특성을 해석한 결과를 실험치와 비교하여 그림 12에 나타내었다. 본 논문에서 제안한 해석결과와 실험치가 거의 일치함을 알 수 있다.

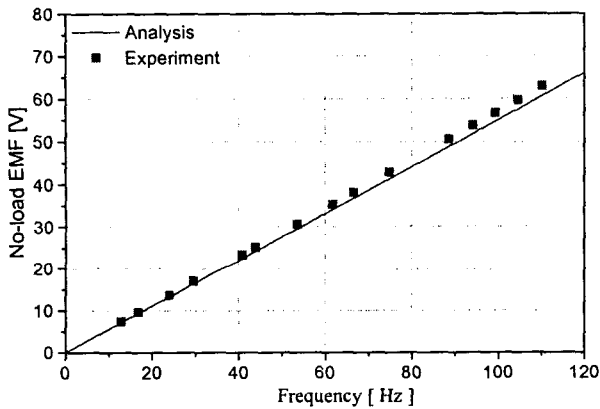


그림 10 무부하 역기전력

Fig. 10 No load EMF

표 2 전류위상각에 따른 실험 data

Table 2 Experimental result by current phase angle

γ	rpm	V_a	i_a	E_0	θ	δ	i_d	i_q	V_d	V_q
5	4114	61.4	85.1	41.1	38	43	7.42	84.8	41.9	44.9
10	4305	61.6	85.1	42.8	34.8	44.8	14.8	83.8	43.4	43.7
15	4570	63	85.2	44	31.5	46.5	22	82.3	45.7	43.3
20	4683	62.3	85.1	44.9	28.1	48.1	29.1	80	46.4	41.7
25	4670	60.3	85.1	45.2	24.6	49.6	36	77.2	45.9	39.1
30	4654	58.6	85.1	44.9	21	51	42.5	73.7	45.5	36.9
35	4502	55.4	85.1	44	17.2	52.2	48.8	69.7	43.8	33.9
40	4217	51	85	42.5	14	53.5	54.7	65.1	41	30.3
45	3691	44.1	85	40	9.6	54.6	60.1	60.1	35.9	25.5
50	3341	39.5	85	36.7	5.3	55.3	65	54.6	32.5	22.5
55	2687	31.7	85	31.8	1.2	56.2	69.5	48.7	26.3	17.6

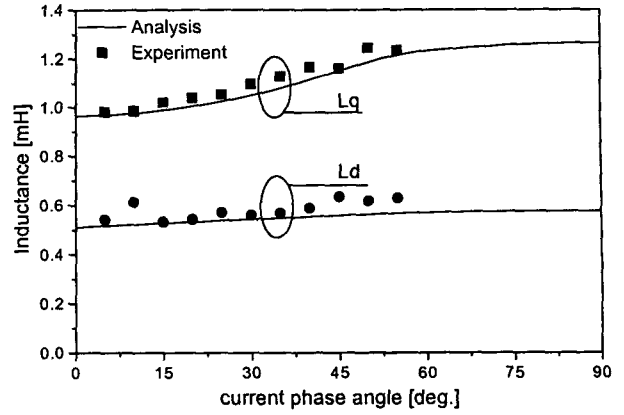


그림 11 전류 위상각 변화에 따른 d-q축 인덕턴스

Fig. 11 d-q Axis inductance by changing of current phase angle

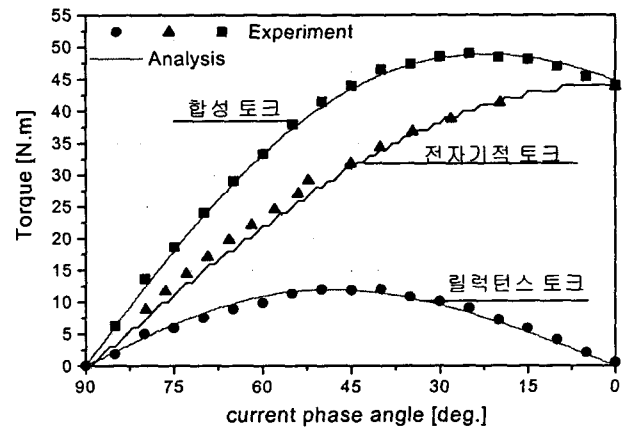


그림 12 토크 특성

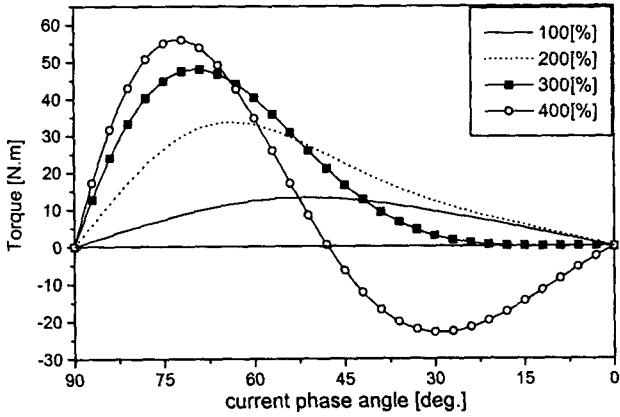
Fig. 12 Characteristic of torque

5. IPMSM의 특성 해석

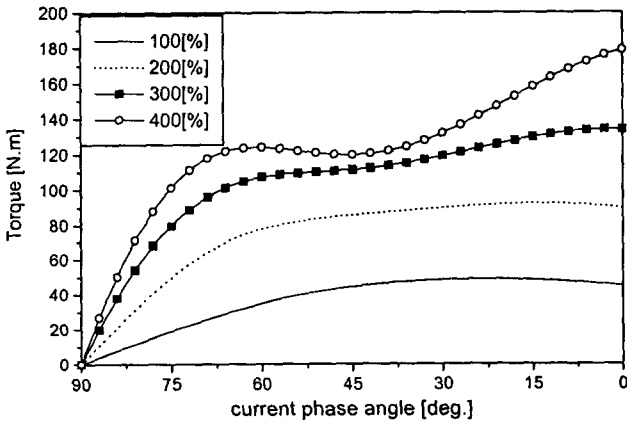
전류 위상각을 고려한 인덕턴스의 산정 결과 q축 인덕턴스는 전류위상각에 따라 급격한 변화가 발생한다. 이러한 인덕턴스의 변화는 IPMSM의 돌극비의 변화가 발생하여 토크 및 출력 특성이 일정한 인덕턴스를 이용한 경우와 비교하여 큰 차이가 발생한다. 그림 13은 릴럭턴스 토크 및 합성 토크를 나타내었다. 부하전류의 증가에 의해 돌극비가 줄어들어 릴럭턴스 토크는 감소한다. 정격 부하토크의 300[%]에서는 전류 위상각이 낮은 영역에서 q축의 자기저항이 증가하여 릴럭턴스 토크는 발생하지 않으며 400[%]에서는 q축 인덕턴스가 d축 인덕턴스 보다 적어 릴럭턴스 토크는 부의 크기를 가지며 발생한다.

정격부하에서 전류 위상각을 고려한 경우와 고려하지 않은 경우 각각의 인덕턴스를 이용하여 속도-출력 특성을 해석한 결과를 그림 14에 나타내었다. 본 논문에서는 인덕턴스 산정 시 전류위상각을 고려한 경우를 non-linear condition으로, 고려하지 않은 경우를 linear condition으로 정의하여 비교하였다. 정토크 영역에서는 큰 차이가 없는 반면 정출력 영역에서는 인덕턴스의 변화에 의해 출력 및 속도 영역의 차가 발

생하며 전류 위상각 특성이 다르게 나타난다. 따라서 인버터 구동 IPMSM의 속도 및 출력 특성을 정확하게 예측하기 위해서는 운전 부하와 속도 즉 구동전류 크기와 전류위상각에 따라 비선형적인 d-q축 인덕턴스를 고려하여 산정해야함을 알 수 있다.

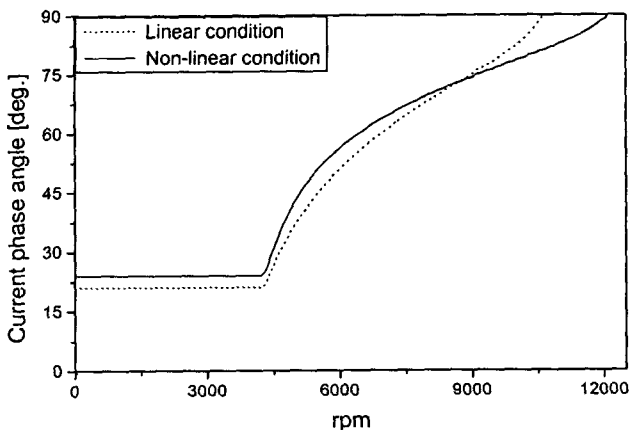


(a) 릴럭턴스 토크

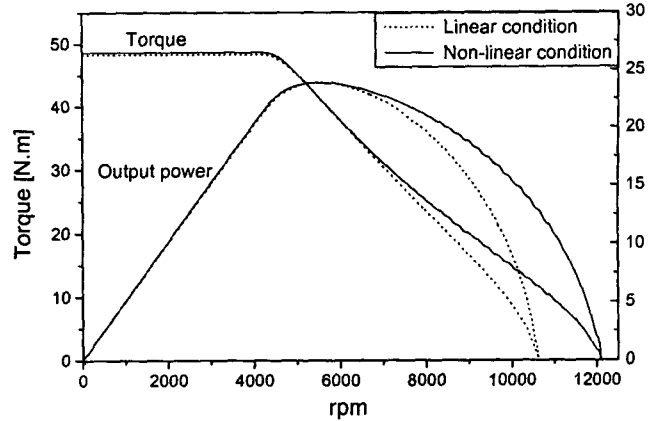


(b) 합성 토크

그림 13 부하 변동에 따른 토크 특성
Fig. 13 Characteristic of torque by load variation



(a) 전류 위상각 변화



(b) 속도-출력 특성

그림 14 IPMSM의 속도 특성
Fig. 14 Speed characteristic of IPMSM

5. 결 론

본 논문에서는 전류 위상각 특성을 고려한 유한요소 해석으로부터 IPMSM의 d-q축 인덕턴스 산정 방법을 제시하고 해석한 결과를 실험치와 비교, 분석하였다. 해석결과 d축 자속은 철심과 영구자석을 통과하므로 d축의 자기저항이 매우 커 부하 전류 및 전류위상각의 변화에 의한 자기저항의 변화는 거의 없다. 따라서 d축 인덕턴스는 부하 전류 및 전류위상각 변화에 무관하게 거의 일정한 값을 가지지만 q축 자속은 회전자 철심만을 따라 지나가므로 부하전류 및 전류 위상각의 변화에 따라 자기 포화의 정도가 다르다. 따라서 q축 인덕턴스는 부하전류 및 전류 위상각에 따라 크게 변화한다. 이러한 d-q축 인덕턴스 변화 특성은 운전부하와 속도 즉 구동전류 크기와 전류위상각에 따라 각각 독립적으로 변하여 전류 특성에 따른 돌극비의 변화를 수반하므로 구동전류의 크기 및 전류 위상각에 따라 릴럭턴스 토크 특성이 비선형적으로 발생한다.

따라서, 인버터 구동 IPMSM의 속도-출력 및 토크 특성을 정확하게 해석하기 위해서는 인버터 구동 시스템의 전류 벡터제어 특성을 고려한 해석이 요구되어진다. 본 논문에서 제시한 방법으로 산정한 인덕턴스를 실험치와 비교한 결과 인덕턴스 및 토크 특성이 거의 일치하여 해석 방법의 타당성을 입증하였다. 인버터 구동 전동기의 동특성 해석을 위해서는 인버터의 고조파 특성을 고려해야 하며 이는 다음 과제로 삼는다.

감사의 글

본 연구는 한국과학재단 지정 창원대학교 공작기계기술 센터의 지원에 의한 것입니다.

참 고 문 헌

- [1] E.Levi, "Saturation Modelling in D-Q Axis Models of Salient Pole Synchronous Machines" *IEEE Trans. J. Ener*, Vol. 14, No. 1, pp. 44-50, Mar. 1999
- [2] M. Azizur Rahman, Ping Zhou "Analysis of Brushless Permanent Magnet Synchronous Motors", *IEEE Trans. J. Ind*, Vol. 43. No. 2, pp. 256~267, APRIL. 1996
- [3] Masayuki Sanada, Shigeo Morimoto and Yoji ta keda, "Interior Permanent Magnet Linear Synchronous Motor for High-Performance Drives", *IEEE Trans. J Ind*, vol. 33, No. 4, pp. 966~972, July/August 1997
- [4] A.M. El-Serafi, A.S. Abdallah, "SATURATED SYNCHRONOUS REACTANCES OF SYNCHRDNDUS MACHINES" *IEEE Trans. J. Ener*, Vol. 7, No. 3, pp. 570-579, Sep. 1992
- [5] Liuchen Chang, "In Improved FE Inductance Calculation for Electrical Machine", *IEEE Trans. J. Magn*, Vol. 32. No. 4, pp. 3237~3245, July. 1996
- [6] Nicola Bianchi and Silverio Bolognani,G. Eason, "Magnetic Models of Saturated Interior Permanent Magnet Motors base on Finite Element Analysis", 0-7803-4943-1/98/\$10.00 © 1998 *IEEE*
- [7] Gyu-Hong Kang, Jung-Pyo Hong의 3인, "Improved parameters modeling of Interior Permanent Magnet Synchronous Motor based on Finite Element Analysis", in *Proc. compumag 99*, pp. 198~199, Oct. 1999
- [8] THOMAS M. JAHNS, GERALD B. KLIMAN, THOMAS W. NEUMANN "Interior Permanent-Magnet Synchronous Motors for Adjustable-Speed Drives", *IEEE Trans. J. Ind*, Vol. IA-22, No. 4, pp. 738-747, JULY/AUGUST. 1986
- [9] B.J. Chalmers, L. Musaba, D.F. Gosden "VARIABLE FREQUENCY SYNCHRONOUS MOTORS DRIVES FOR ELECTRIC VEHICLES", 0-7803-3008-0/95 \$4.00 © 1995 *IEEE*
- [10] Ajith H. Wijenayake, Peter B. Schmidt, "Modeling and Analysis of Permanent Magnet Synchronous Motor by Taking Saturation and Core Loss into Account", in *Proc. PEDS 97*, pp. 530~534, May. 1997

저 자 소 개



강 규 홍 (姜圭洪)
 1967년 11월 5일생. 1992년 창원대 공대 전기공학과 졸업. 1994년 동 대학원 전기공학과 졸업(석사). 1994년~1998년 LG전자(주) 주임 연구원. 1997년~현재 동 대학원 전기공학과 박사과정
 Tel : 0551-279-7519
 E-mail: kgh1004@cosmos.changwon.ac.kr



김 규 탁 (金奎卓)
 1961년 11월 12일생. 1982년 한양대 공대 전기공학과 졸업. 1984년 동 대학원 전기공학과 졸업(석사). 1991년 동 대학원 전기공학과 졸업(공박). 현재 창원대 공대 전기공학과 부교수. 1996년~1997년 일본 무稻田大 客員研究員
 Tel : 0551-279-7515
 E-mail : gtkim@sarim.changwon.ac.kr



홍 정 표 (洪正杓)
 1959년 4월 17일생. 1983년 한양대 공대 전기공학과 졸업. 1985년 동 대학원 전기공학과 졸업(석사). 1985년~1990년 LG정밀(주) 중앙연구소 주임연구원 1990년~1992년 삼성전기(주) 종합연구소 선임연구원. 1995년 동 대학원 전기공학과 졸업(공박). 1996년~1996년 한양대 산업과학연구소 선임연구원. 현재 창원대 공대 전기공학과 조교수
 Tel : 0551-279-7517
 E-mail : jphong@sarim.changwon.ac.kr