

박형구조를 갖는 매입형 동기전동기의 인덕턴스 산정 및 특성해석

論 文

53B-10-3

Analysis of Inductance and Reluctance Torque Characteristics for Thin-Type IPMSM

金基男[†] · 梁海元^{*}
(Ki-Nam Kim · Hai-Won Yang)

Abstract - This paper presents electro-magnetic characteristics of an Interior type Permanent Magnet Synchronous Motor (IPMSM) for traction applications. The importance of instantaneous electric propulsion capability for high torque has been highlighted in the present study and thus parametric analysis is performed by Finite Element Method (FEM). The paper provides analytical & experimental results, which demonstrate a performance of the studied traction motor. The goal of this paper is to present a maximum power performance for traction motor which works extension of its own rated power. Experimental results meet well with FEM analysis of traction motor owing to inductance difference.

Key Words : IPMSM, Parametric Analysis, FEM, Traction Motor, Maximum Power

1. 서 론

최근 환경 및 에너지 고갈의 문제가 심각하게 대두되면서 이에 대응하는 에너지 절감형 무공해/저공해 자동차의 개발이 절실히 요구 된다 [1-4].

기존엔진과 전기모터를 병렬구조로 사용하는 하이브리드 전기자동차의 경우, 국내를 비롯한 세계 각국에서 연구개발을 시작하여 실용화 단계에 접어들었으며 연비 최적화를 위한 구동시스템의 경량화 및 전기모터의 소형·경량화, 고효율화, 고효율을 위한 에너지 밀도가 높고 운전영역이 넓은 영구자석 타입의 매입형 동기전동기 (Interior type Permanent Magnet Synchronous Motor, IPMSM)에 대한 연구가 지속적으로 활발하게 진행 중에 있다[5-8]. 에너지밀도가 높은 매입형전동기의 특성해석에서는 국부적인 자기포화현상이 심하기 때문에 d-q축 전류의 크기와 전류위상각에 따른 인덕턴스의 정확한 산정이 무엇보다도 중요하다.

본 논문에서는 IPMSM의 자기회로 및 등가회로를 구성하여 특성해석을 위한 방정식을 정립하였고, 특히, IPMSM의 핵심부분인 d, q축 인덕턴스 산출방법에 대해 집중적으로 고찰하였으며 이를 통해 릴럭턴스 토크 최대화 및 IPMSM의 최대출력특성에 대해 검토하였다[9-10].

특성해석 결과는 실험을 통해 그 결과의 타당성을 검증하였고, 차량 구동원으로 운전특성을 개선할 수 있는 방안도 아울러 제시하였다.

2. 매입형 동기전동기

2.1 매입형 동기전동기의 특성

영구자석이 회전자 내부에 매입되어 있는 IPMSM은 고속회전 시, 영구자석 이탈을 방지할 수 있고, d축과 q축 인스 차이로 인해 그림 1에서와 같이 릴럭턴스 토크가 발생하며 특정한 전류위상에서 영구자석에 의한 토크 보다 큰 토크를 얻을 수 있다. 또한 전동기에 흐르는 전류의 위상제어를 통해 토크-속도 운전영역의 확대가 가능하게 되며 이러한 특성은 동일한 크기의 표면 부착형 영구자석 전동기에 비해 효율적인 전동기설계를 가능하게 한다.

차량구동용 전동기의 운전영역은 가속특성이 필요한 정토크 영역과 고속운전 영역인 정출력 영역으로 나눌 수 있다. 일반적으로 정토크 영역에서는 최대토크제어, d축 전류 억제, 역률제어 및 공극자속 일정제어 등이 사용되고, 정출력 영역에서는 운전 영역을 넓히기 위해 약계자제어 기법이 사용된다 [10].

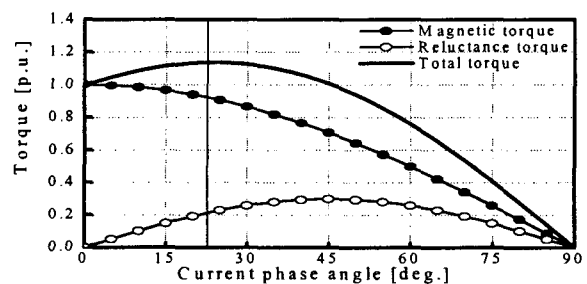


그림 1 발생토크
Fig. 1. Generated Torque

† 교신저자, 正會員 : 漢陽大學校 機電大學科 博士課程
E-mail : knkim60@hyundai-motor.com

* 正會員 : 漢陽大學校 電子 컴퓨터 工學部 教授 · 工博
接受日字 : 2004年 8月 19日
最終完了 : 2004年 9月 8日

2.2 IPMSM의 등가회로 및 벡터도

IPMSM은 역돌극성의 자기 특성을 갖고 있기 때문에 일반적으로 d-q축으로 나누어 특성을 해석한다.

그림 2에 본 논문에서 고찰하는 IPMSM의 전동기 모드에서의 등가회로를 나타내었다 [10].

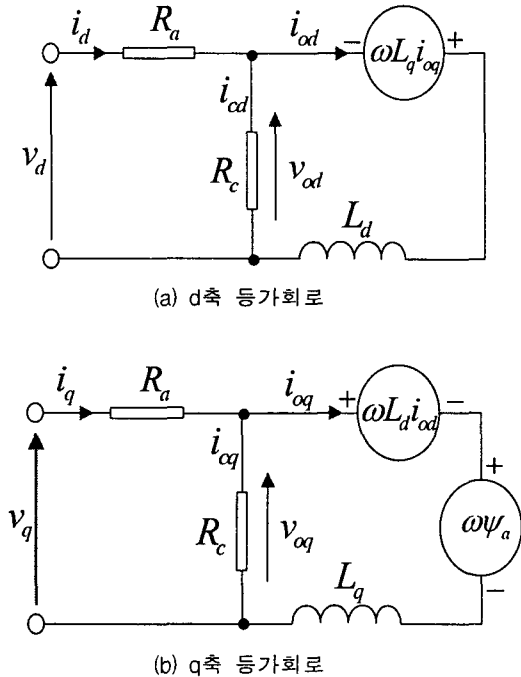


그림 2 전동기의 등가회로
Fig. 2. Equivalent Circuit of Motor

여기에서 R_c 는 철손의 등가저항이며, Ψ_a 는 극 당 유효자속이다.

그림 2의 d-q축 전압방정식은 식(1)과 같이 쓸 수 있다.

$$\begin{bmatrix} v_d \\ v_q \end{bmatrix} = R_a \begin{bmatrix} i_d \\ i_q \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} v_{od} \\ v_{oq} \end{bmatrix} + p \begin{bmatrix} L_d & 0 \\ 0 & L_q \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_d \\ i_q \end{bmatrix} \quad (1)$$

$$\begin{bmatrix} v_{od} \\ v_{oq} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & -\omega L_q \\ \omega L_d & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_d \\ i_q \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ \omega \Psi_a \end{bmatrix}$$

그리고 등가회로로부터 전압은 식(2)~식(4)와 같은 관계가 성립하고 역률은 식(5)와 같으며, IPMSM의 발생토크는 식(6)과 같이 표현할 수 있다.

$$V_0 = \sqrt{v_{od}^2 + v_{oq}^2} = \omega \Psi_0 = \omega \sqrt{(L_d i_d + \Psi_a)^2 + (L_q i_q)^2} \quad (2)$$

$$V_a = \sqrt{v_d^2 + v_q^2} = \sqrt{(R_a i_d - \omega L_q i_q)^2 + (R_a i_q + \omega L_d i_d + \omega \Psi_a)^2} \quad (3)$$

$$v_d = -V_a \sin \delta, v_q = V_a \cos \delta \quad (4)$$

여기서, 정상상태에서 $V_a = V_l$ 이고 V_l 은 선간전압의 실효치이며, Ψ_0 는 쇠교자속이다.

$$\cos \phi = \cos(\delta - \beta) \quad (5)$$

여기서, β 는 전류위상각, δ 는 부하각, ϕ 는 역률각이다.

$$\begin{aligned} T &= P_n \Psi_a i_q + (L_d - L_q) i_d i_q \\ &= P_n \Psi_a I_a \cos \beta + \frac{1}{2} (L_d - L_q) I_a^2 \sin(2\beta) \\ &= T_m + T_r \end{aligned} \quad (6)$$

여기서, T_m 은 마그네틱 토크이고, T_r 은 릴럭턴스 토크이다.

2.3 가변속 운전특성

IPMSM은 회전자 내부에 영구자석이 삽입되어 있기 때문에 고속회전 시 영구자석의 비산을 방지 할 수 있다. 그리고 d축과 q축의 인덕턴스 차이로 인하여 마그네틱 토크와 릴럭턴스 토크를 이용할 수 있고 약 제자제어 범위가 넓다. 이러한 IPMSM의 운전영역에 따른 제어방법은 전류 크기와 전류 위상각을 제어하는 방법을 많이 사용한다. IPMSM의 운전영역은 그림 3에 나타낸 것과 같이 정토크 영역과 정출력 영역으로 나눌 수 있다. 일반적으로 정토크 영역에서는 최대토크제어, d축 전류 영 제어, 역률제어 및 공극자속 일정제어 등이 사용되고 정출력 영역에서는 전류위상각 제어를 통해서 운전 속도 범위를 확장할 수 있다.

본 연구에서는 기저속도 이하의 정토크 발생영역에서는 전동기의 최대토크제어 특성을 해석하고 기저속도 이상에서는 전원의 한계를 고려하여 정출력 특성을 갖는 약제자운전 방식과 최대 효율 제어를 적용하여 전동기의 출력 특성을 각각 해석하였다.

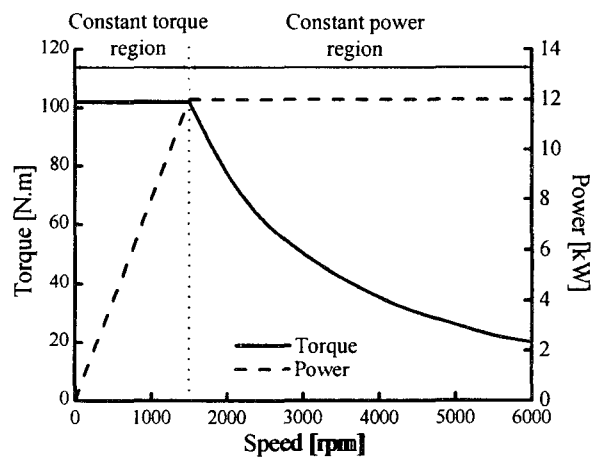


그림 3 IPMSM의 이론적 운전특성
Fig. 3. Theoretical Characteristics of IPMSM

가. 최대토크 제어

역돌극 특성을 지닌 IPMSM은 동일 전류에 대하여 발생 토크를 최대로 할 수 있는 전류위상이 존재한다.

이것은 전기자 전류에 대하여 가장 효과적으로 토크가 발생하는 조건이다. 보통, 이와 같은 상태가 되도록 전류벡터를 제어하는 방법을 “최대토크/전류제어”라고도 부른다. 이 조건을 만족하는 최적전류위상은 I_a 와 β 로 표현한 식 (7)의 토크식을 전류위상각 β 로 편미분하여 0으로 두면 다음 식으로부터 구할 수 있다.

$$\beta = \sin^{-1} \left(\frac{-\psi_a + \sqrt{\psi_a^2 + 8(L_q - L_d)^2 I_a^2}}{4(L_q - L_d)I_a} \right) \quad (7)$$

d-q축 전류의 관계는 다음과 같이 표현된다.

$$i_d = \frac{\psi_a}{2(L_q - L_d)} - \sqrt{\frac{\psi_a^2}{4(L_q - L_d)^2} + i_q^2} \quad (8)$$

나. 약계자 제어

영구자석에 의해 계자자속을 얻는 IPMSM에서는 계자자속을 직접 제어할 수 없다. 그러나 전동기의 입력 전류에 대한 전류위상각을 조절하여 부의 d-축 전류를 흘림으로써, d-축 전기자 반작용에 의한 감자효과를 이용하여 d-축 방향의 자속을 감소시킬 수 있으며 등가적인 약계자 제어를 실현할 수 있다. 따라서 권선계자형 전동기의 약계자 제어는 속도가 상승함에 따라 계자전류를 감소시켜 제어를 할 수 있는 반면에 IPMSM의 약계자제어는 부(-)의 방향으로 d-축 전류를 증가시켜가며 제어하게 된다.

약계자제어에 의해 전동기 단자전압 V_a 를 제한치 이하로 억제하는 제어가 가능한데, 본 연구에서는 특성해석의 편의를 위해서 유기전압 V_0 를 그 제한치 V_{0m} 으로 유지하는 것으로 본다.

$$(L_d i_d + \psi_a)^2 + (L_q i_q)^2 = \left(\frac{V_{0m}}{\omega} \right)^2 \quad (9)$$

3. 인덕턴스 산정

3-1. 유한요소 해석에 의한 인덕턴스 산정

비선형적인 특성을 가지는 하이브리드 자동차구동용 IPMSM의 d-q축 인덕턴스를 산정하는 방법으로 유한요소법을 이용하는 것이 매우 유용하다. 인덕턴스를 산정하는 방법으로는 자석쇄교법과 에너지 중첩법이 널리 이용되고 있는데 본 논문에서는 해석이 용이한 에너지 중첩법을 이용하였다.

에너지 중첩법은 여자전류와 저장에너지로부터 인덕턴스를 계산하는 방법이다. IPMSM은 자기적으로 비선형 영역이 존재하기 때문에 에너지 중첩법을 성립시키기 위해서 영구자석과 고정자 전류를 동시에 여자하여 비선형해석을 한 후 각 요소에서의 투자율을 이용하여 고정자 전류만을 다시 여자하고 선형해석을 통해서 d-q축 인덕턴스를 산정하였다. 이러한 인덕턴스 산정 과정을 그림 4에 나타내었다. 인덕턴스를 구하기 위해서 먼저 고정자의 권선 배치를 A상을 기준으로 d축을 중심으로 모델링하고 비선형해석을 수행한 후, 그림 5에서와 같이 크기가 1인 3상 전류를 이용하여 d축과 q축의 인덕턴스를 각각 구할 수 있다 [9-12].

이렇게 구해진 저장에너지와 d-q축 각각의 인덕턴스는 다음과 같은 관계식이 성립한다. 전동기 입력전류 I_a 는 상전류 I_e 와 다음과 같은 관계를 가진다.

$$I_a = \sqrt{3} I_{erms} = \frac{\sqrt{3}}{\sqrt{2}} I_{emax} \quad (10)$$

여기서, I_{erms} 는 상전류 I_e 의 실효치, I_{emax} 는 상전류 I_e 의 최대값이다. 선형 해석 시 고정자의 권선 기자력에 의한 자극을 d축에 세우면 d축 전류는 $i_d = I_a$, 또는 q축에 세우면 q축 전류는 $i_q = I_a$ 가 성립한다. 이때 산정된 d-q축 저장에너지는 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$W_{d,q} = \frac{1}{2} L_{d,q} i_{d,q}^2 = \frac{1}{2} L_{d,q} \left(\frac{\sqrt{3}}{\sqrt{2}} I_{emax} \right)^2 = \frac{3}{4} L_{d,q} I_{emax}^2 \quad (11)$$

여기서 상전류 최대치가 1인 3상 전류를 인가한다면, d-q축 저장에너지와 각각의 인덕턴스는 다음과 같다.

$$W_{d,q} = \frac{1}{2} L_{d,q} \left(\frac{\sqrt{3}}{\sqrt{2}} \times 1 \right)^2 = \frac{3}{4} L_{d,q} \quad (12)$$

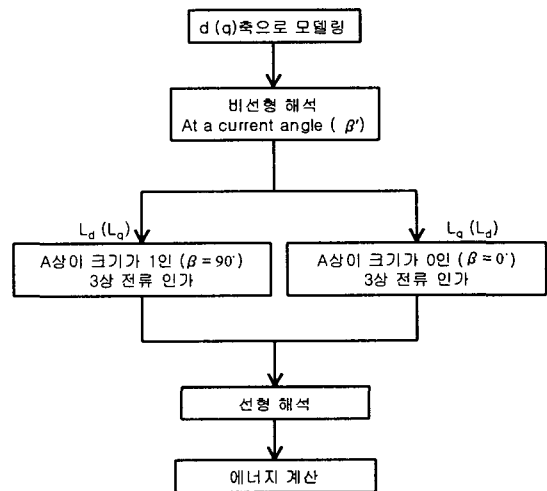


그림 4 유한요소법을 이용한 인덕턴스 계산 과정
Fig. 4. Process of Inductance Calculation by FEM

본 논문에서 대상으로 하고 있는 전동기는 하이브리드 자동차 구동용으로서 엔진과 트랜스미션 사이에 위치하며 제한된 장착 공간 및 고효율요구특성으로 인해 길이가 짧고 직경이 상대적으로 큰 박형 타입으로서 16극 24슬롯의 구조를 갖고 있으며, 사용된 전기자와 회전자 코어의 재질은 S18이다.

영구자석은 잔류자속밀도 1.05[T]인 NdFeB 계열의 희토류자석이며, 전기자 권선 전류는 전동기의 운전전류를 고려하여 275[A]까지를 해석하였다. 자기회로 구조상 그림 5에 나타난 것처럼 고정자 권선의 배치와 영구자석 배치에 따른 d-q축 자기회로가 대칭적이지 못하므로 두 가지 자기회로 상태에 대해서 d-q축 인덕턴스를 각각 구하여 평균값을 취했다. 한편 전기자 권선 단부에서의 누설인덕턴스는 다음 식으로부터 산정하였다 [11].

$$L_{end} = 0.002 \pi^2 a \left(\frac{2a}{b} \right) N^2 K \quad [\mu H] \quad (13)$$

여기서, $2a$ 는 코일 직경, b 는 코일 높이, N 은 상당 직렬 턴수, K 는 나가오카 계수를 각각 나타낸다.

3-2. 해석결과.

유한요소 해석결과 d축 자속의 경로는 선형특성을 가지지만 q축 자속은 자석간의 단락을 방지하기 위하여 구성된 자석 barrier의 포화정도에 따라서 크게 변동하고 d축과 q축의 자속경로에 의해 자기저항의 차가 발생함을 알 수 있다. 또한 IPMSM의 자석 barrier의 포화정도는 전류의 크기 및 전류위상각에 따라 크게 변화한다.

그림 6은 전류위상각 변화 및 부하전류에 대한 d,q축 인덕턴스 해석결과를 나타내며, 그림7은 d축 및 q축 전류 변화에 대한 3차원 인덕턴스 지도의 해석결과를 나타내고 있다. 해석결과에서 보듯이 d-q축 전류가 증가 할수록 인덕턴스가 감소하며, q축과 d축의 인덕턴스 차이가 감소하고 있다.

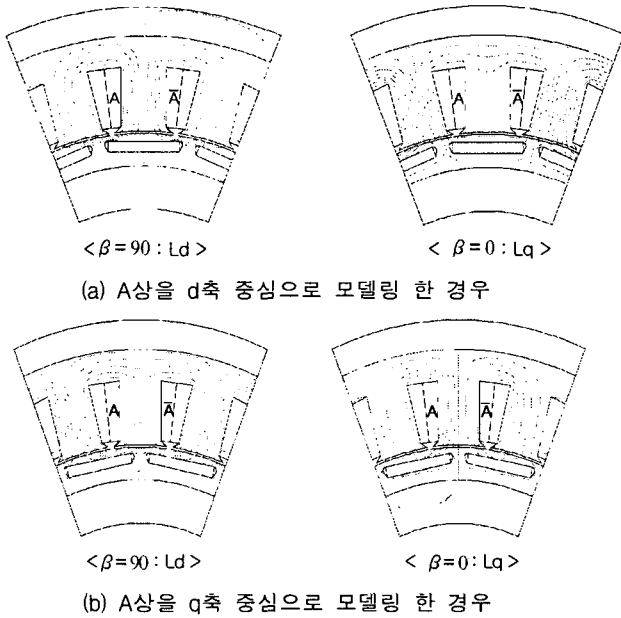


그림 5 비대칭적인 자기회로
Fig. 5. Non-symmetrical Magnetic Circuit

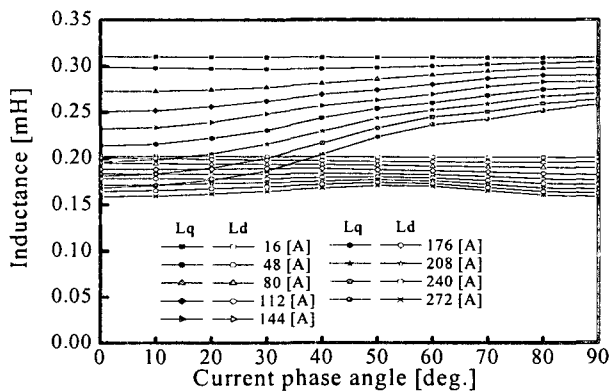
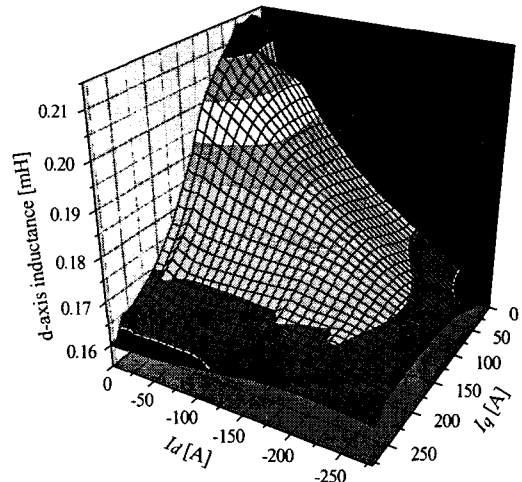
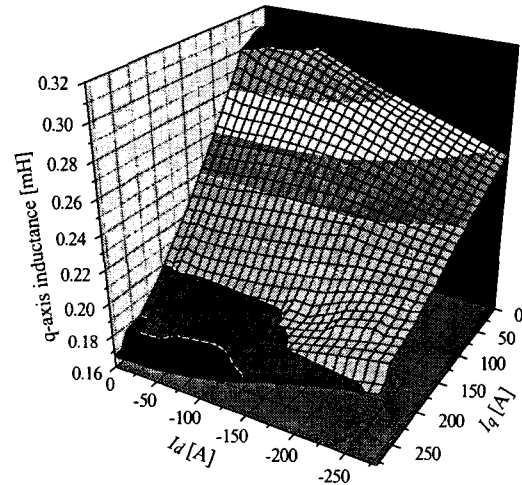


그림 6 전류에 따른 인덕턴스
Fig. 6. Inductance Profile

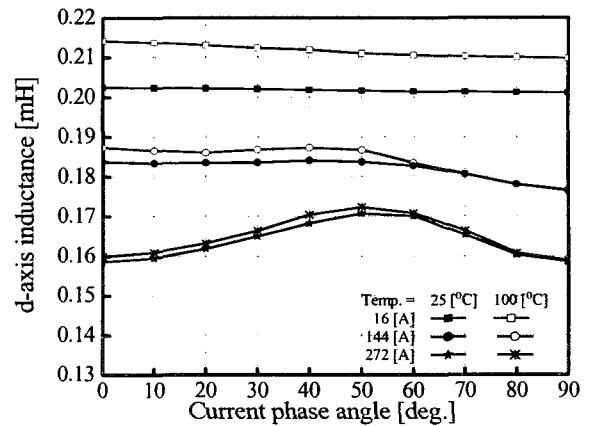


(a) d축 인덕턴스

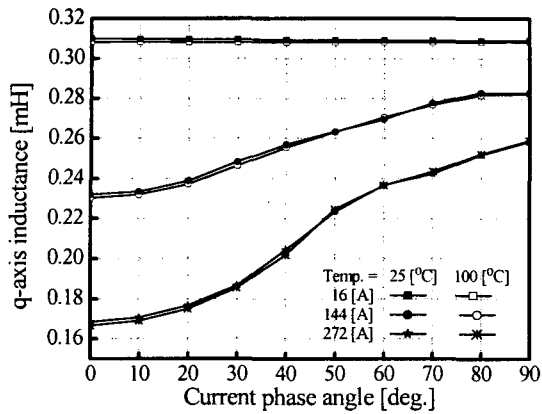


(b) q축 인덕턴스

그림 7 인덕턴스 특성
Fig. 7. Inductance Profile



(a) d축 인덕턴스



(b) q축 인덕턴스

그림 8 전동기 운전 온도에 따른 Ld, Lq의 특성 변화
Fig. 8. Variations of Ld, Lq as to Operating Temperature

그림 8은 기본모델에 대하여 전동기의 운전온도가 25[°C]와 100[°C]일 때, 전류 위상각에 따른 인덕턴스 변화 특성을 d-q축 전류변화에 따른 관점으로 바라 봤을 때, d-q축 인덕턴스의 변화 양상을 나타낸 것이다. 그림 (a)에서 보는바와 같이 d축 인덕턴스는 전기자 권선 전류가 증가하면서 인덕턴스의 차이가 감소하고 있는데 이것은 전기자 권선 전류가 적을 경우에는 영구자석의 온도감자가 자기회로의 포화상태에 미치는 영향이 상대적으로 크기 때문이다. 전류변화에 따른 인덕턴스 영향을 좀더 상세히 알아보기 위해, 전류위상각 0, 운전온도 25°C인 경우에 d-q축 인덕턴스 변화를 살펴보면, d축인 경우는 약 22%(0.202→0.159)감소한 반면, q축은 약 46%(0.310→0.167)감소되어 전류가 증가함에 따라 q축 인덕턴스가 현저히 감소되어 결과적으로 d-q축 인덕턴스 차이가 줄어들음을 알 수 있는데, 이는 전류가 증가하면 d축에 비해 q축 인덕턴스가 자기포화 때문에 인덕턴스 감소율이 더 크게 변하는 특성에 기인한다. 한편 온도변화에 따른 영향을 살펴보면, d, q축 인덕턴스 모두 약간의 영향을 받고 있지만 미미한 것으로 확인되었다.

4. 실험결과

해석의 신뢰성을 확인하기 위하여 대상 전동기의 공극자계분포, 역기전력, 코강토크 및 d-q축 인덕턴스에너지에 대한 실험결과와 해석결과를 비교 검토하였다.

그림 9는 공극자속밀도 파형으로 공극자계분포가 해석결과와 유사한 수준(약0.6[T])으로 측정되었으며, 그림 10은 역기전력 파형의 해석결과로써 집중권 방식의 고정자 구조에 기인하여 계단모양의 역기전력을 갖고 있음을 확인할 수 있다. 역기전력상의 고조파 성분은 구동전동기의 전류제어 성능을 저하시키는 요인이 될 수 있으므로 가급적 정현파에 가깝도록 자석의 배치 및 구조가 이루어져야 한다. 전동기의 저속에서의 진동특성에 영향을 미치는 코강토크 특성은 돌극비에 따라 증가하는 경향을 나타내며 그림 11과 같이 침투치

가 커지는 특성을 보이고 있다.

인덕턴스 시험방법은 철손에 대한 영향을 최소화시키기 위해 전동기를 상당히 낮은 50 [rpm]의 저속으로 회전시키면서, d축 인덕턴스는 q축 전류가 영인 전류위상각 β를 90[°]로 제어하고, q축 인덕턴스는 d축 전류가 영인 전류위상각 β를 0[°]로 제어 및 인가시켜 그 때의 d축 전압을 측정하여 이로부터 d축 인덕턴스를 산정하였다. 이 같은 실험을 전류를 25[A]부터 차츰 증가시켜 250[A]까지 수행하였으며, q축 인덕턴스에도 동일한 방법으로 산정하였다. 표1은 이 실험에 사용된 데이터를 나타내었다. 그림 12는 전류 변화에 따른 d-q축 인덕턴스의 실험치와 해석치를 각각 비교하고 있는데, 유한요소법을 이용하여 산정한 d-q축 인덕턴스 값과 실험값이 잘 부합함을 알 수 있다.

이것으로부터 IPMSM 특성해석 시 유한요소해석을 이용한 d-q축 인덕턴스변화를 확인하였다.

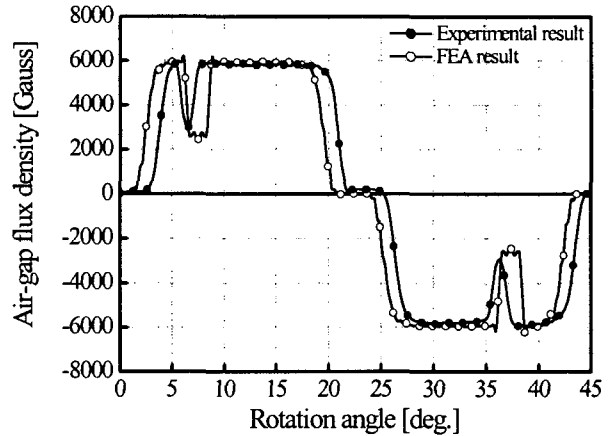


그림 9 공극자속밀도 분포
Fig. 9. Air-gap Flux Density Distribution

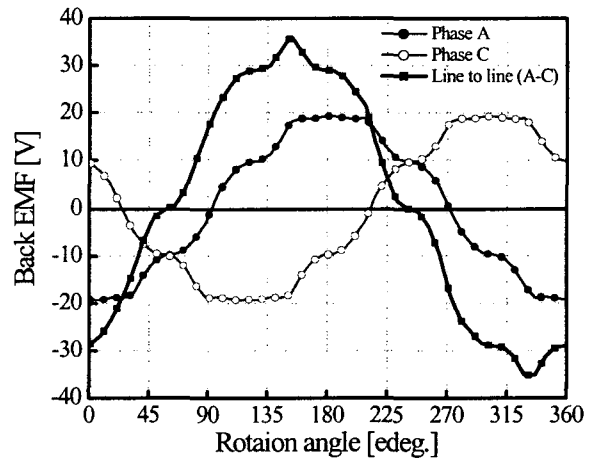


그림 10 역기전력 파형
Fig. 10. Back EMF Waveform

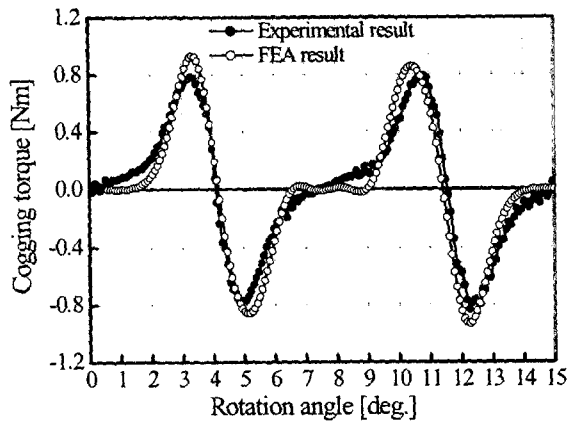


그림 11 코깅토크
Fig. 11. Cogging Torque

표 1 L_d 와 L_q 추정을 위한 파라미터

Table 1 Parameters for the Estimation of L_d and L_q

선전류(A)	d축전압(v_d)	q축전압(v_q)	각속도(ω)	쇄교자속량(ϕ_m)
25	0.349	1.003	41.88	0.0182
50	0.582	1.221	41.88	0.0182
75	0.801	1.378	41.88	0.0182
100	1.026	1.574	41.88	0.0182
125	1.209	1.694	41.88	0.0182
150	1.394	1.874	41.88	0.0182
175	1.576	2.015	41.88	0.0182
200	1.692	2.194	41.88	0.0182
225	1.800	2.326	41.88	0.0182
250	1.864	2.500	41.88	0.0182

(여기서, 모터회전수: 50rpm)

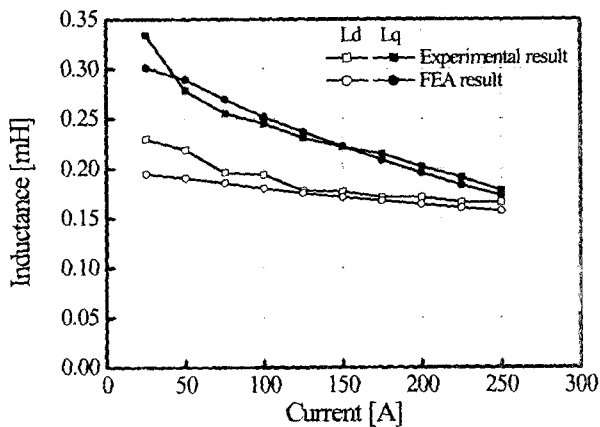
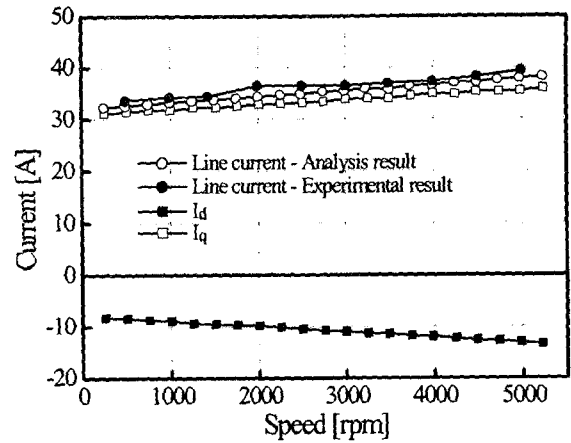
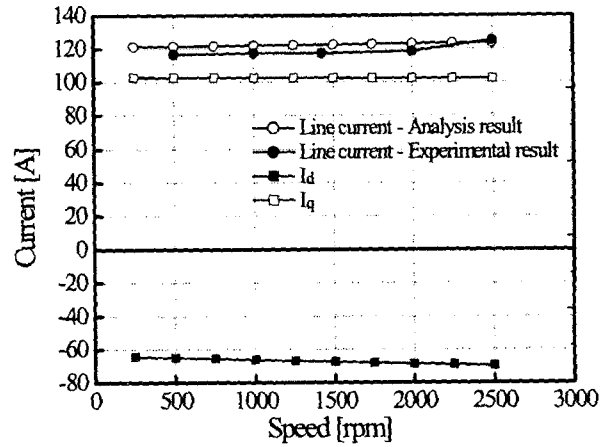


그림 12 전류에 따른 인덕턴스변화
Fig. 12. Inductance Variation as to Currents

그림 13에 부하조건에 따른 d-q축 전류 및 상전류의 변화 특성을 실험결과와 비교하여 나타내었으며, 해석결과와 실험 결과가 잘 부합하고 있음을 알 수 있다.



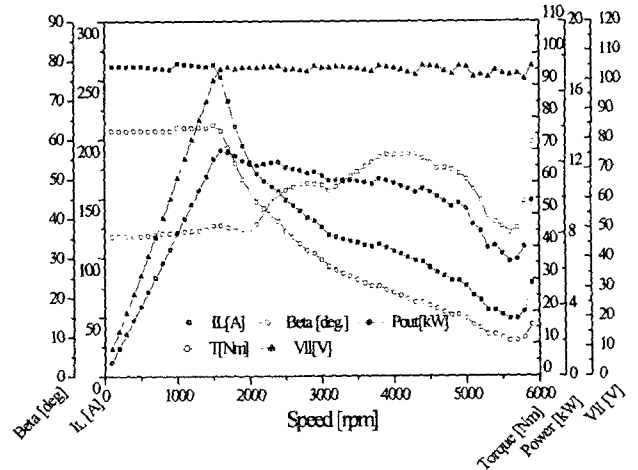
(a) 10 [Nm]



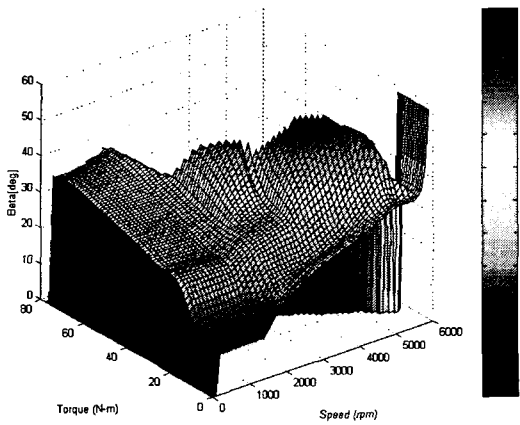
(b) 40 [Nm]

그림 13 부하에 따른 전류변화
Fig. 13. Current Characteristics

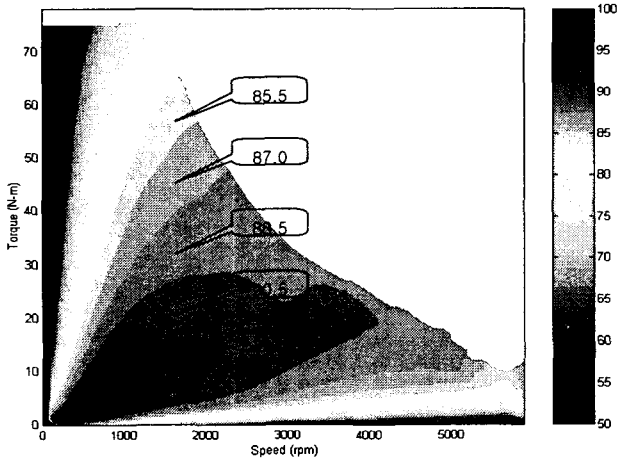
그림 14는 해석모델인 IPMSM의 운전특성 및 전류위상에 따른 토크-속도특성, 그리고 효율 지도를 나타내고 있다.



(a) 운전특성



(b) 전류위상 분포



(c) 효율 지도

그림 14 IPM 전동기의 운전특성

Fig. 14. Operating Characteristics of Model

5. 결론 및 고찰

IPMSM은 영구자석에 의한 자기적인 출력이외에 인덕턴스 변화에 기인한 릴럭턴스 출력을 이용하는 전동기이다. 따라서 본 논문에서는 인덕턴스의 변화에 대한 자기적인 조건과 그에 따른 인덕턴스의 변화를 해석 및 실험을 통하여 고찰하였고 이를 통하여 전동기의 운전영역의 확장이 가능하였다. 또한 하이브리드 차량 구동원으로 요구되는 최대토크특성을 발휘하기 위해 장착공간이 제한된 구조적 범위 내에서 릴럭턴스 토크를 증대 시켰으며 최대부하영역에서 1.1배, 저부하영역에서 1.5배의 돌극 특성을 확인하였다.

IPMSM은 제어성이 전동기의 특성에 미치는 영향이 크므로 제어기 구성이 복잡해지는 단점이 있고 또한 토크제어를 위해 비선형적으로 변화하는 인덕턴스의 변화를 예측하여야

한다.

본 논문에서 제시한 인덕턴스의 비선형 특성을 고려한 해석방법을 이용하여 높은 출력밀도와 고효율의 설계가 가능하여 앞으로 그 적용범위를 확대할 수 있을 것이다.

참 고 문 헌

- [1] G. Henneberger, G. Bailly, and J.R. adji-Minaglou, "Design and comparison of different motor types for electric vehicle application," in *EVS-11 Symposium Proceedings*, Florence, Italy, Vol. 1, September 27-30, 1992,
- [2] D.F. Gosden, "Wide speed range operation of an ac pm ev drive," in *EVS-11 Symposium Proceedings*, Florence, Italy, Vol. 1, September 27-30 1992.
- [3] J. Luomi, J. Lindstrom, and J. Hellsing, "Design and analysis of electrical motors for a hybrid electric vehicle," in *IEEE/Stockholm Power Tech Conference Proceedings*, Stockholm, Sweden, Vol. Electrical Machines and Drives, pp. 274-279. June 18-22 1995,
- [4] T. Sebastian and G.R. Slemon, "Operating limits of inverter-driven permanent magnet motor drives," *IEEE Transactions on Industry Applications*, Vol. 23, No. 2, pp. 327-333, March 1987.
- [5] R.F. Schiferl and T.A. Lipo, "Power capability of salient pole permanent magnet synchronous motors in variable speed drive applications," *IEEE Transactions on Industry Applications*, Vol. IA-26, No. 1, pp. 115-123, January 1990.
- [6] W.L. Soong and T.J.E. Miller, "Field-weakening performance of brushless synchronous ac motor drives," *IEE Proc.-Electr. Power Appl.*, vol. 141, no. 6, pp. 331-340, November 1994.
- [7] A. Hedman, "Transmission and vehicle simulation models for a hybrid electric vehicle," *Tech. Rep. R-96-01*, Sweden, May 1996.
- [8] "Electric vehicle energy consumption and range test procedure," SAE Standard J1634, 1995.
- [9] Gyu-Hong Kang, Jung-Pyo Hong, Gyu-Tak Kim, Jung-Woo Park. "Improved parameters modelling of Interior Permanent Magnet Synchronous Motor based on Finite Element Analysis", *IEEE Trans. on MAGNETICS*, Vol. 36, No. 4, pp. 1867-1870, July 2000.
- [10] 武田洋次, 松井信行, 森本茂雄, 本田幸夫, 埋込磁石同期モータの設計と制御, オーム社, 2001.
- [11] Frederick W. Grover, *Inductance calculations*, D. Van Nostrand Company, INC.,

저 자 소 개



김기남 (金基男)

1962년 6월 5일생. 1986년 한양대 기계공학과 졸업. 1988년 동 대학원 기계공학과 졸업(공학석사), 2004년 동 대학원 기전공학과 박사과정. 1987~99년 만도중앙연구소, 1999~2002 (주)삼코연구소, 2003~현재 현대자동차 연구소(선임연구원)
Tel : 031-368-7477, Fax : 031-368-7476
E-mail : knkim60@hyundai-motor.com



양해원 (梁海元)

1950년 3월 20일생. 1971년 서울대 전기공학과 졸업. 1973년 동 대학원 전기공학과 졸업(공학석사), 1982년 일본 Kyoto대 전기공학과 졸업(공학박사). 1993년 미국 Yale대 방문교수. 1986년~현재 한양대학교 전자컴퓨터공학부 교수. 대한전기학회 부회장.
Tel : 031-400-5162, Fax : 031-406-7769
E-mail: hwyang@email.hanyang.ac.kr