

매입형 영구자석 동기전동기의 돌극성을 고려한 인덕턴스 산정 및 토크특성 해석

강규홍, 이주민, 홍정표, 김규탁, 박정우*, 김종무*
 창원대학교 전기공학과, *한국전기연구소

Analysis of inductances and torque characteristics considering saliency in IPMSM

Gyu-Hong Kang, Ju-Min Lee, Jung-Pyo Hong, Gyu-Tak Kim, Jeong-Woo Jung*, Jong-Mu Kim*
 Dept. of Electrical Engineering, Chang-won Univ., *KERI

Abstract - This paper presents the d-q axis inductances calculations method of Interior Permanent Magnet Synchronous Motor(IPMSM) by using Finite Element(FE) analysis. The inductances of d-q axis in IPMSM, which is the function of current magnitude and phase angle are computed by energy dual method. The appropriateness of the proposed FE analysis has been verified by comparing with experimental results.

1. 서 론

영구자석을 이용하는 전동기는 단위중량 당 출력비가 우수하여 추진시스템이나 압축기의 구동원으로 적용되어지고 있다. 영구자석 기기는 회전자의 구조에 따라 자기 회로의 구성이 다르게 나타나고 인덕턴스와 토크특성이 변화한다. 회전자의 구조에 따라 영구자석이 회전자 표면에 부착되어 있는 표면 부착형과 회전자 철심 내부에 매입이 되어있는 매입형으로 대별되고, 표면부착형의 경우 영구자석의 자극과 고정자 권선에 의한 자극의 상호 위치에 따른 인덕턴스의 변화는 없다. 그러나 매입형의 경우는 인덕턴스의 차가 발생하고 토크 및 출력 특성이 표면 부착형과는 상이하다. 따라서 매입형의 경우 회로 정수 산정시 새로운 방법이 필요하다.

영구자석 기기의 인덕턴스를 산정하는 방법으로는 자기회로를 간단한 형태의 전기회로로 치환하여 집중정수로 고려해서 해석하는 등가자기회로법과 전자계의 분포 현상으로부터 수치해석적인 방법을 적용하는 유한요소 해석이 있다. [1][2] 본 논문에서는 유한요소 해석을 이용하여 매입형 영구자석 기기의 인덕턴스를 산정하고 실험치와 비교 분석하였다.

매입형 영구자석 동기전동기는 각 상에 대한 회로정수를 산정하여 구성한 3상 전압방정식으로부터 전동기의 토크 및 운전 특성이나 과도상태등을 해석하기 위해서는 복잡한 형태의 미분방정식을 풀어야한다. [1] 따라서 전동기의 과도상태 및 운전특성을 해석하기 위해서 3상의 전압방정식을 d-q축의 2상 전압방정식으로 변환하면 간단하게 해석할 수 있다. [1][4] 따라서 기기의 특성을 해석하기 위해서는 d-q축의 파라미터들을 정밀하게 산정해야 한다. 매입형 기기는 구조적으로 국부적인 포화 현상을 발생하도록 설계하고 있다. 이러한 특성은 고정자의 권선과 회전자의 상호 위치에 따라 포화의 정도가 다르게 나타나고, 공극자속과 인덕턴스가 비선형적으로 변화한다. 인덕턴스의 비선형적인 변화를 해석하기 위해서는 회전자의 위치를 이동시켜야 하지만 계산시간의 증대와 전류의 위상변화에 따른 특성을 해석하기가 어렵다. 따라서 본 논문에서는 매입형 영구자석 동기전동기(Interior Permanent Magnet Synchronous Motor : IPMSM)의 해석을 위하여 d-q축으로 분리하여 유한요소법을 적용하였다. 인덕턴스의 비선형성은 전류 위상

각을 변화하여 에너지 중첩의 원리를 적용하여 해석하였고, 실험치와 비교하여 해석의 타당성을 입증하였다.

2. IPMSM의 모델

IPMSM의 수학적 모델을 위하여 공간 벡터법을 이용하여 2상 동기 좌표계에서의 전압방정식을 구성하였다. 그림 1에서는 2상 직교 좌표계를 나타내었다. [1][3]

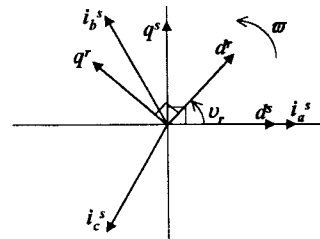


그림 1. 2상 직교 좌표계

회전자를 기준으로 한 동기좌표계에서는 좌표축(d^r - q^r 축)이 동기속도로 회전하고 있으므로 동기속도로 회전하고 있는 고정자의 전압과 전류 벡터는 회전자 축상에서는 일정한 값을 가지므로 간단한 형태의 모델이 가능하다.

전압과 전류에 대한 고정좌표계 값을 회전 좌표계로 변환하는 좌표 변환의 관계는 다음과 같다.

$$V_d^r + j V_q^r \equiv v_s(t) e^{-j\omega t} \quad (1)$$

$$i_d^r + j i_q^r \equiv i_s(t) e^{j\omega t} \quad (2)$$

전압방정식을 동기좌표계로 나타내어 실수부와 허수부로 분리하면 다음과 같다.

$$\begin{aligned} V^r &= V_{ds}^r + j V_{qs}^r \\ &= [R_s i_{ds}^r + L_{ds} \frac{di_{ds}^r}{dt} - \omega_r L_{qs} i_{qs}^r] \\ &\quad + j [R_s i_{qs}^r + L_{qs} \frac{di_{qs}^r}{dt} + \omega_r (L_{ds} i_{ds}^r + \psi_f)] \end{aligned} \quad (3)$$

여기서 ω_r 은 동기 각속도이다. $V_{ds}^r, V_{qs}^r, i_{ds}^r, i_{qs}^r$ 는 d, q 축 전압 및 전류이고 L_{ds}, L_{qs} 는 d, q 축 인덕턴스, R_s 는 고정자 저항, ψ_f 는 영구자석에 의한 총 채교자속이다.

동기전동기의 출력으로부터 구한 토크 방정식은 다음과 같다. [1]

$$T_e = \frac{3}{2} \left(\frac{p}{2} \right) [\psi_f i_{qs}^r + (L_{ds} - L_{qs}) i_{ds}^r i_{qs}^r] \quad (4)$$

첫째항은 회전자가 d 축에 일치된 자석자속과 q 축에 일치된 고정자 전류의 상호작용에 의하여 발생하는 전자기적 토크성분이고 두번째항은 d 축과 q 축의 자기저항의 차에 의해 발생하는 릴럭턴스 토크성분이다. 따라서 IPMSM의 토크 및 출력 특성을 해석하기 위해서는 공극자속과 d - q 축 인덕턴스의 정밀한 모델링이 요구되어진다.

3. 유한요소법에 의한 파라미터 모델링

IPMSM은 구조적으로 국부적인 포화현상에 의해 자기저항의 차가 발생하므로 인덕턴스의 정밀한 산정이 요구되어지나 집중정수로 고려하여 자기회로를 해석하는 경우 d 축과 q 축의 인덕턴스 L_{ds}, L_{qs} 는 일정한 값을 가진다. [2][3] 그러나 회전자와 고정자의 상대위치에 따라 회전자 철심의 국부적인 포화 정도가 다르기 때문에 인덕턴스의 변화가 발생한다. 따라서 본 논문에서는 IPMSM의 파라미터 산정을 위해서 유한요소법을 적용하였고 인덕턴스의 산정은 에너지 중첩의 원리를 이용하였다.

3.1 에너지 섭동법에 의한 인덕턴스의 산정

IPMSM의 정상상태 인덕턴스를 유한요소법으로 부터 산정하는 방법으로는 자속왜곡법과 저장에너지를 이용하는 방법이 있다.

에너지 섭동법(energy perturbation method)으로부터 인덕턴스를 산정하기 위해서 해석 영역 전체의 저장 에너지는 다음과 같다. [3]

$$W = \sum_{j=1}^n W_j = \sum_{j=1}^n \left[\sum_{k=1}^n \int_{i_{k0}}^{i_{k1}} (L_{jk}^{inc} i_j) di_k \right] \quad (5)$$

n 권선의 자기 인덕턴스와 상호 인덕턴스(self and mutual inductance)항은 각 권선의 전류섭동 Δi_j 에 관한 전체 저장 에너지 밀도 W 의 편미분으로 표현된다.

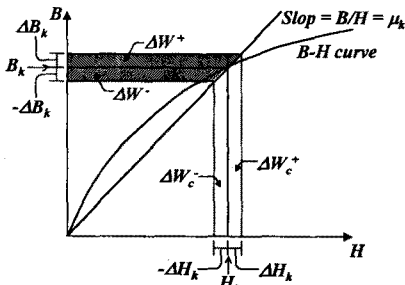


그림 2. 에너지 섭동법 모델

$L_{jk} = L_{kj}$ 인 기기에서 자기 인덕턴스와 상호 인덕턴스를 산출해 내는 항은 다음과 같다. [1][2][3]

$$L_{jj} = \frac{\partial^2 W}{\partial (\Delta i_j)^2} \approx \frac{1}{(\Delta i_j)^2} \begin{pmatrix} W(i_j + \Delta i_j) \\ -2W(i_j) \\ +W(i_j - \Delta i_j) \end{pmatrix} \quad (6)$$

$$L_{jk} = \frac{\partial^2 W}{\partial (\Delta i_j) \partial (\Delta i_k)}$$

$$\approx \frac{1}{4\Delta i_j \Delta i_k} \begin{pmatrix} W(i_j + \Delta i_j, i_k + \Delta i_k) \\ -W(i_j + \Delta i_j, i_k - \Delta i_k) \\ -W(i_j - \Delta i_j, i_k + \Delta i_k) \\ +W(i_j - \Delta i_j, i_k - \Delta i_k) \end{pmatrix} \quad (7)$$

3.2 에너지 중첩법에 의한 인덕턴스의 산정

에너지 섭동법에 의한 모델링은 결정된 위치에서의 인덕턴스 산정은 정확하지만 돌극성을 가지는 IPMSM의 경우 d, q 축 인덕턴스를 산정하기 위해서는 각 상의 자기 인덕턴스와 상호 인덕턴스로부터 d - q 축 변환행렬을 추가적으로 연산하거나 해석 모델을 이동해가면서 해석하는 moving line technique가 적용되어야 하므로 계산 시간의 증가한다. 또한 IPMSM의 경우 d, q 축 인덕턴스는 전류의 크기와 고정자와 회전자의 위치에 따른 포화의 정도에 따라 다르게 나타난다.

$$L_{d,q} = f(i, \theta) \quad (8)$$

에너지 섭동법으로 회전자 위치에 따른 d, q 축 인덕턴스의 변화를 해석하기는 다소 곤란하다. 따라서 본 논문에서는 에너지 중첩의 원리를 적용하여 d, q 축 인덕턴스를 산정하였다. 에너지 중첩에 의한 인덕턴스의 산정 과정을 그림 3에 나타내었다. 회전자의 위치에 따른 인덕턴스의 변화는 전류위상각을 변화하여 해석하였다.

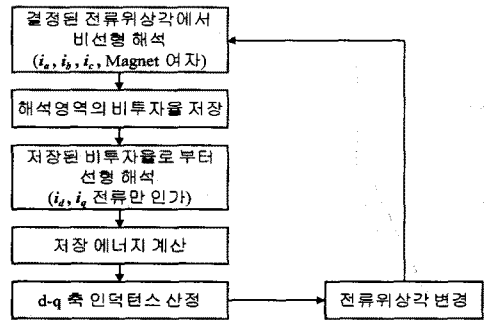


그림 3. 인덕턴스 산정 과정

4. 실험에 의한 d-q축 인덕턴스 산정

IPMSM은 부하상태에서 영구자석 동작점의 이동과 회전자의 국부적인 포화가 발생하므로 무부하 상태에서의 인덕턴스와는 큰 차이가 있다. 무부하시의 인덕턴스는 회전자의 위치를 이동하면서 측정하여 에너지 섭동법과 중첩법의 결과와 각각 비교하였다. 그러나 부하 상태에서 인덕턴스를 직접 측정하기 어렵기 때문에 운전상태에서의 벡터도로부터 간접적인 방법으로 인덕턴스를 산정하는 방법을 본 논문에서 제시하였다. [4]

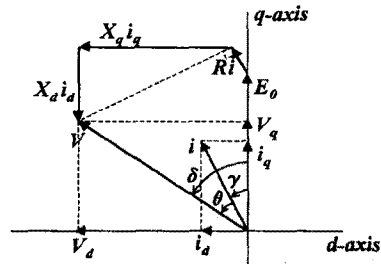


그림 4. 정상상태 벡터도

Dynamometer에서 부하시험을 하였고 전류위상각 γ 는 인버터에서 결정하여 i_d, i_q 를 구하였으며 V_d, V_q 는 역률각과 상전압으로부터 결정하였다. 무부하 역기전력 (E_0)는 상온에서 측정하여 운전중의 온도로 보정하였다. 정상상태에서의 벡터도를 그림 4에 나타내었다.

그림 4의 벡터도로부터 L_d, L_q 는 다음의 식으로 구하여 해석치와 비교하였다.

$$L_d(\gamma) = \frac{E_0 + Ri_q - V_q}{\omega_e i_d} \quad (9)$$

$$L_q(\gamma) = \frac{V_d - Ri_d}{\omega_e i_q} \quad (10)$$

5. 해석 및 실험 결과

공극자속의 특성을 평가하기 위해서 무부하 역기전력과 무부하시의 회전자 위치에 따른 인덕턴스를 측정 한 결과를 그림 6에 나타내었다. 온도조건은 상온 25°C로 해석치와 거의 일치함을 알 수 있다. 회전자 위치에 따른 무부하 인덕턴스를 산정하기 위해 moving line technique을 적용하여 에너지 섭동법으로 해석한 결과를 그림 7에 실험치와 비교하였다. 무부하 인덕턴스 L_d, L_q 도 해석결과와 일치함을 알 수 있다. 그러나 에너지 섭동법으로는 전류위상의 변화에 따른 인덕턴스를 직접 산정하기는 곤란하여 에너지 중첩법을 적용한 결과를 그림 8에 나타내었다.

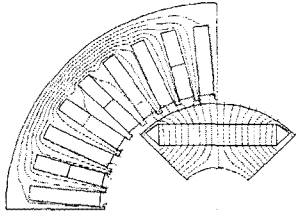


그림 5. 동포텐셜 분포도

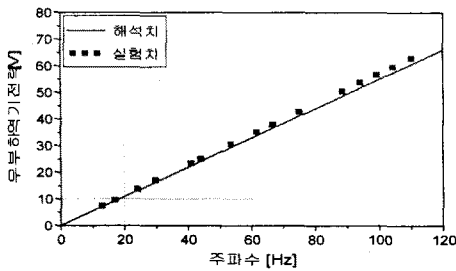


그림 6. 무부하 역기전력

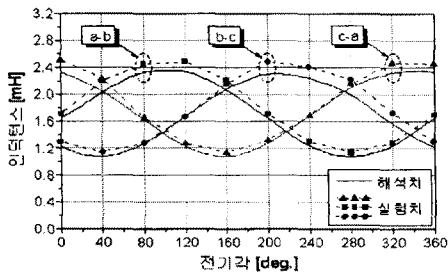


그림 7. 에너지 섭동법으로 산정한 인덕턴스

정적부하 상태에서의 인덕턴스는 인버터에서 전류위상을 조절하였으며 전압, 전류 및 역률은 power analyzer로부터 측정하여 산정하였다. 측정된 data는 표 1에 나타내었고, 전류위상각에 따른 에너지 중첩법에 의한 해석결과와 함께 나타내었다. d축 인덕턴스 $L_d(\gamma)$ 는 전류위상에 따른 변화가 거의 없지만 q축 인덕턴스 $L_q(\gamma)$ 는 급격한 변화가 발생함을 알 수 있다.

표 1. 전류위상각에 따른 실험 data

τ	rpm	V_s	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

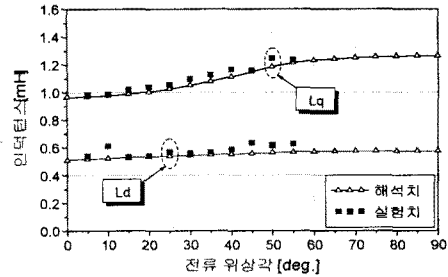


그림 8. 전류위상각에 따른 d-q축 인덕턴스

6. 결론

본 논문에서는 유한요소 해석을 이용하여 IPMSM의 d-q축 인덕턴스 산정을 위한 방법을 제시하고 해석한 결과를 실험치와 비교, 분석하였다. 해석결과 q축 인덕턴스는 전류의 크기 및 위상에 따라 포화의 정도가 달라 인덕턴스의 변화가 크게 나타난다. 이러한 특성은 부하의 상태에 따라 돌극비의 변화가 발생하고 톨럭턴스 토크 변화를 발생하기 때문에 정밀하게 산정해야함을 알 수 있다.

부하 상태에서의 전류위상각 변화에 따른 인덕턴스를 측정하기 위해서 인버터를 이용하여 간접적인 방법으로 측정하여 해석치와 비교한 결과 q축 인덕턴스는 비선형적으로 변화함을 알 수 있다.

[참고 문헌]

- [1] Jacek F.Gieras, Mitchell Wing Permanent Magnet Motor Technology, Marcel Dekker, Inc. 1997
- [2] Liuchen Chang "In Improved FE Inductance Calculation for Electrical Machine", IEEE Trans. on Magn, Vol.32.No.4,pp.3237~3245,July,1966
- [3] Nicola Bianchi and Silverio Bolognani, "Magnetic Models of Saturated Interior Permanent Magnet Motors base on Finite Element Analysis", 0-7803-4943-1/98/\$10.00 © 1998 IEEE
- [4] Ajith H. Wijanayake, Peter B. Schmidt, "Modeling and Analysis of Permanent Magnet Synchronous Motor by Taking Saturation on Core Loss into Account", in Proc.PEDS 97, pp.530~534,May, 1998