

매입형 영구자석 동기전동기의 인덕턴스 산정에 관한 연구

김성일, 이석희, 홍정표, 이지영\*  
 창원대학교 전기공학과, 한국전기연구원 황자속 연구그룹\*

A Study on Inductance Calculation of Interior Permanent Magnet Synchronous Motor

Sung-Il Kim, Suk-Hee Lee, Jung-Pyo Hong, Ji-Young Lee\*  
 Changwon National University, KERI\*

**Abstract** - The purpose of this paper is to discuss the reasons creating the difference between inductances calculated and measured in the interior permanent magnet synchronous motor designed for the traction. Moreover, the method applied to estimate the inductance is introduced in this paper.

1. 서 론

매입형 영구자석 동기전동기(Interior PM synchronous motor : IPMSM)의 경우 높은 출력밀도 및 고효율 그리고 넓은 운전속도 영역과 같은 많은 장점들을 지니고 있어 산업 전반에 걸쳐 그 적용 분야가 증가하고 있는 추세이다. 특히 하이브리드 및 전기자동차와 같은 공간적인 제약과 효율이 중요시 되는 곳에 사용하기에 가장 적합한 전동기 중의 하나이다. 따라서 이러한 이점들을 최대한 활용하기 위해서는 IPMSM의 설계 단계에서부터 정확한 특성예측이 요구되어 진다.

IPMSM의 특성을 정확히 예측하기 위해서는 많은 전기적인 파라미터들 중에서도 인덕턴스의 산정이 매우 중요하다. 이는 인덕턴스가 출력토크 및 최대속도 등과 같은 IPMSM의 특성 대부분에 영향을 주고 있을 뿐만 아니라 철손과 함께 정확한 값을 예측하기 어려운 인자 중의 하나이기 때문이다 [1]. 따라서 본 논문에서는 IPMSM의 인덕턴스 산정하기 위한 방법들 중에 하나를 제시하며 그 방법에 의해 산정된 인덕턴스와 실제 측정된 인덕턴스와의 비교를 통해 오차 발생 원인에 대해서 의논하고자 한다.

2. 본 론

2.1 해석모델 및 IPMSM의 등가회로

그림 1은 자동차의 traction용으로 설계된 집중권 타입의 IPMSM의 형상을 나타내며 표 1은 주요 치수 및 설계 사양을 보여주고 있다. 또한 철손을 고려한 IPMSM의 d-q축 등가회로는 그림 2와 같으며 이를 바탕으로 세워진 전압방정식은 아래와 같다 [1].

$$\begin{bmatrix} v_d \\ v_q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R_a & 0 \\ 0 & R_a \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{od} \\ i_{oq} \end{bmatrix} + \left(1 + \frac{R_a}{R_c}\right) \begin{bmatrix} v_{od} \\ v_{oq} \end{bmatrix} \quad (1)$$

$$\begin{bmatrix} v_{od} \\ v_{oq} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & -\omega L_q \\ \omega L_d & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{od} \\ i_{oq} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ \omega \psi_a \end{bmatrix} \quad (2)$$

여기서,  $v_d$ 와  $v_q$ 는 d, q축 단자전압을  $R_a$ 와  $R_c$ 는 전기자 권선 및 철손 저항을  $\psi_a$ 는 영구자석에 의한 쇠교 자속을 각각 나타낸다. 그리고 전압방정식의 제약조건으로는 다음과 같다.

$$I_a = \sqrt{i_d^2 + i_q^2} \leq I_{am}, \quad V_a = \sqrt{v_d^2 + v_q^2} \leq V_{am} \quad (3)$$

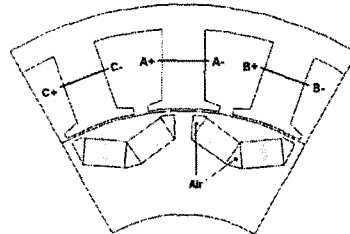
여기서,  $I_{am}$ 과  $V_{am}$ 은 각각 최대 입력전류 및 전압을 나타낸다.

2.2 인덕턴스 산정방법 및 적용

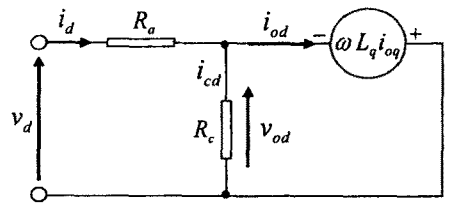
IPMSM의 특성해석은 식 (1)과 (2) 그리고 식 (3)에 의하여 수행하게 되는데 이를 위해서는 전류 및 전류 위상각의 변화에 따른 d-q축 인덕턴스를 미리 산정해 놓아야 한다. 본 논문에서는 [2]에서 제시된 방법과는 달리 그림 3에 나와 있는 정상 상태에서의 IPMSM 기본 벡터도를 바탕으로 식 (4)에 의해 d-q축 인덕턴스를 산정하였다.

<표 1> 해석모델의 치수 및 설계사양

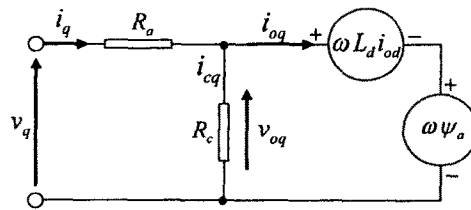
항목	사양	항목	사양
고정자 외경	292mm	DC link voltage	320V
회전자 외경	204.8mm	정격 출력	20kW
적층 길이	85mm	정격 전류	70A
공극 길이	0.9mm	기저 및 최대속도	680, 3400rpm
Br @120°C	1.103T	극수	12



<그림 1> 해석모델의 형상



(a) d축 등가회로



(b) q축 등가회로

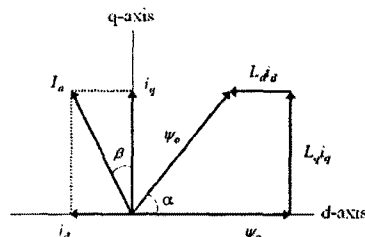
<그림 2> IPMSM의 d-q축 등가회로

$$L_d = \frac{\psi_o \cos \alpha - \psi_a}{i_d}, \quad L_q = \frac{\psi_o \sin \alpha}{i_q} \quad (4)$$

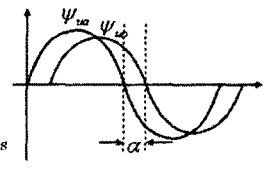
여기서,  $\psi_o$ 는 전기자 반작용을 고려한 총 쇠교 자속이며,  $\psi_a$ 는 영구자석에 의한 무부하 쇠교 자속을 나타낸다. 이들은 유한요소해석으로부터 얻을 수 있으며 고조파 분석을 통해 기본파 성분만 고려하게 된다. 또한  $\alpha$ 는  $\psi_o$ 와  $\psi_a$ 의 위상차를 나타내는데 그림 4에서 이를 설명하고 있다.

2.4 측정치와의 비교 및 분석

앞 절에서 산정된 d-q축 인덕턴스는 spline 보간을 통해 look-up table 형식으로 데이터가 만들어지게 되고 이를 이용하여 IPMSM의 속도 영역에 따른 운전 제어 방식을 고려하면서 식 (1)과 (3)을 만족시키는 인덕턴스를 사용하게 된다.



<그림 3> IPMSM의 기본 벡터도



<그림 4>  $\psi_o$ 와  $\psi_a$ 의 위상차

실험을 통해 d-q축 인덕턴스를 측정할 때도 전압방정식을 이용하게 되며 다음과 같이 나타낼 수 있다 [3].

$$v_d = R_a i_d + \frac{d}{dt} \lambda_d - \omega L_q i_q \quad (5)$$

$$v_q = R_a i_q + \frac{d}{dt} \lambda_q + \omega (L_d i_d + \psi_a) \quad (6)$$

여기서, 속도 변화가 없다면 d-q축 전압방정식의 자속 미분 항은 없게 되며, 이 때  $L_d, L_q$ 에 대해 정리하면 인덕턴스를 계산할 수 있게 된다.

그림 5는 전류 및 전류 위상각의 변화에 따라 식 (4)에 의해 산정된 인덕턴스와 실험을 통해 측정된 전압, 전류 등을 식 (5)와 (6)에 대입하여 얻은 인덕턴스를 보여주고 있다. 그 그림에서 볼 수 있듯이 두 인덕턴스 사이에 많은 차이가 있는 것을 확인할 수 있는데, 특히 q축 인덕턴스의 경우에는 전류 위상각이 커질수록 그 차이가 더 커지는 것을 볼 수 있다.

이런 차이가 발생할 수 있는 첫 번째 이유는 해석상에서 고려한 온도 조건과 실험조건이 일치하지 않는데 있을 수 있다. 이렇게 되면 해석 시 고려했던 영구자석의 Br 값과 실험에서의 그것이 틀러지기 때문에 코일에 쇄교하는 자속량은 틀러지게 된다. 두 번째 이유는 전동기 제작 시 정확한 철심 재질의 사용 여부이다. 이 부분 또한 전동기 내의 쇄교 자속량과 밀접한 관계에 있으므로 확인이 필요한 부분일 것이다. 그러나 위에서 제시한 두 가지 이유는 q축 인덕턴스에서 발생하는 현상을 설명하기에는 부족한 면이 있다. 그래서 본 논문에서는 다음과 같은 세 번째 이유를 제시하고자 한다.

인덕턴스의 정의를 간단히 살펴보면 단위 전류 당 코일에 쇄교하는 자속의 양이다. 이는 자기적으로 유효한 인덕턴스를 가리키는 것으로 그림 2에 나와 있는 등가회로에서도 철손 저항으로 인한 손실 전류를 제외하고  $i_{od}$ 와  $i_{oq}$ 에 의해 발생하는 쇄교 자속을 이용하고 있음을 확인할 수 있다. 하지만 측정을 통해 얻어지는 인덕턴스는 식 (5)와 (6)에 나와 있는 것처럼 철손은 물론이고 기계손에 의한 손실 전류 모두를 포함하고 있다. 따라서 본 논문에서는 손실 전류에 의한 영향을 도식적으로 살펴보기 위하여 철손 전류를 고려한 벡터도를 그림 6에 나타내었으며, 자기적으로 유효한 인덕턴스에 영향을 미치는 전류에 철손으로 인한 손실 전류가 포함됨으로써 많은 부분이 달라지고 있음을 확인할 수 있다. 그림 7에서는 식 (1)과 (3)의 전압방정식을 만족시키는  $i_{oq}, i_{od}$ 에 그 때 등가회로에 흐르는 철손 전류를 포함시켜 식 (5)와 (6)에 대입하여 얻은 인덕턴스 결과를 보여주고 있다. 여기서도 마찬가지로 많은 차이가 나고 있는데 이는 앞에서 제시한 두 가지 이유와 함께 기계손에 의한 손실 전류 및 정확한 철손을 고려하지 못해서 발생한 것으로 판단되어 진다. 하지만 q축 인덕턴스의 경우 앞서 와는 달리 그 차이가 많이 좁혀져 있는 것을 확인할 수 있다.

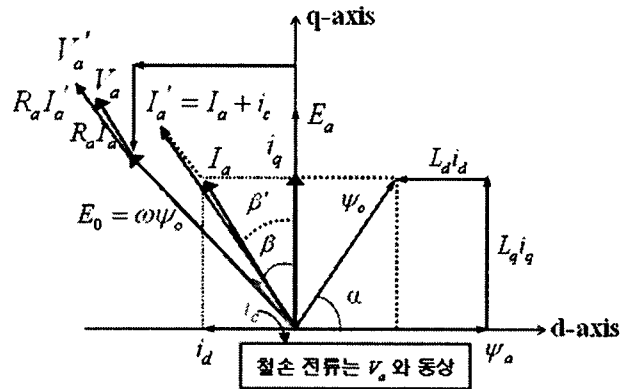
### 3. 결 론

본 논문에서는 해석치와 실제 측정된 인덕턴스 사이에 왜 차이가 발생하는지에 대해서 살펴보았다. 본 논문에서 제시된 원인 이외에 더 많은 이유가 있을 수 있겠지만 분명한 것은 손실 전류로 인해 두 인덕턴스를 비교했을 때 근본적으로 차이가 생길 수 있다는 것을 확인할 수 있었다. 따라서 이 부분을 어떻게 고려할 것인지에 대해 생각해 보아야만 좀더 정확한 IPMSM 특성해석을 수행할 수 있을 것으로 사료된다.

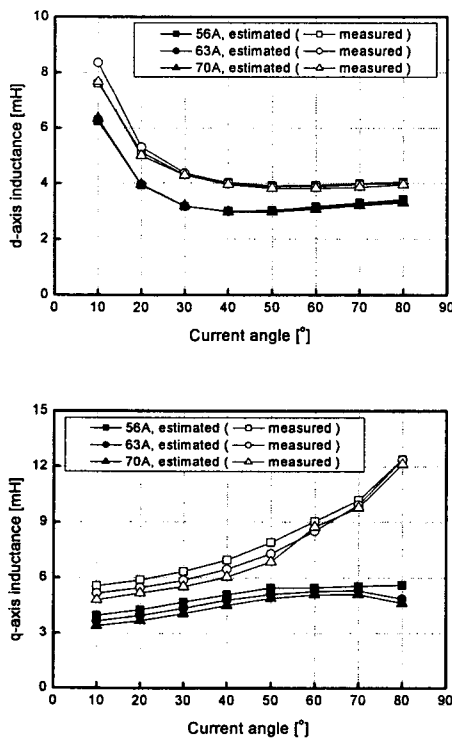
본 연구는 산업자원부 지방기술혁신사업 (RT104-01-03) 지원으로 수행되었습니다

### [참 고 문 헌]

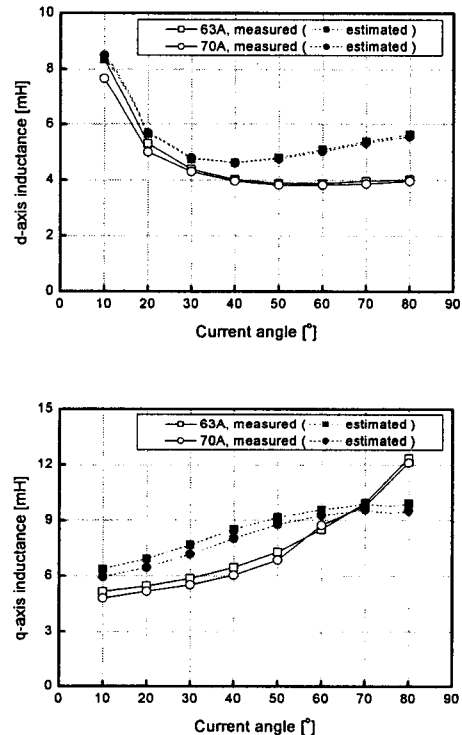
- [1] 武田洋次, 森本茂雄, 本田幸夫, 埋込磁石 同期モータ의 設計と 制御, Ohmsha, 2001.
- [2] J. Y. Lee, S. H. Lee, G. H. Lee, J. P. Hong, and J. Hur, "Determination of parameters considering magnetic nonlinearity in an interior permanent magnet motor", *IEEE Trans. Magnetics*, vol. 42, no. 4, pp. 1303-1306, April 2006.
- [3] 설승기, 전기기기제어론, 브레인 코리아, 2002.



<그림 6> 철손 전류를 고려한 IPMSM의 벡터도



<그림 5> 해석치와 실측치의 인덕턴스 비교



<그림 7> 철손 전류를 고려한 해석치와 실측치의 인덕턴스 비교