

## 매입형 영구자석 동기 전동기의 d-q축 인덕턴스 측정 및 철손의 고려

권순오\*, 최진철\*\*, 이우택\*\*, 홍정표\*

한양대학교 기계 공학부\*, 창원대학교 제어계측 공학과\*\*

### Core loss Consideration for d-q axis Inductance Measurement of IPMSM

Soon-O Kwon\*, Jin-Chul Choi\*\*, Woo-Taek Lee\*\*, Jung-Pyo Hong\*  
 School of Mechanical Engineering, Hanyang University\*  
 Changwon National University\*\*

**Abstract** - This paper deals with d-q axis inductance measurements of IPMSM considering core loss at low speed. d-q axis inductance measurements generally are conducted at rated speed and parallel core loss model can be used to exclude core loss effects on inductances. Core loss is generally modeled parallel to input terminal of d-q axis equivalent circuit. Therefore, the effect of core loss on inductance calculation can be varied by core loss modeling. In this paper, d-q axis inductance is calculated parallel and series core loss modeling. Calculated inductances are compared to FEA results and it is concluded that series core loss modeling is more closed to FEA results at low speed.

타내었다[3]. 전압 방정식은 식 (4), (5)와 같다. 철손의 영향을 제외한 인덕턴스의 산정은 식 (6)과 같다.

철손 저항의 병렬 모델링은 저항의 전압 강하를 제외한 전압( $v_0$ )의 예측이 가능하고, 직렬 모델링은 입력 전류가 바로 출력 토크에 기여한다는 차이가 있다. 따라서, 실제 운전 상태의 병렬 모델링에서 철손 전류는 측정이 불가능 하므로 전류 위상 제어에서 지령 및 피드백 전류는 유효한 축 토크를 발생 시키는 전류가 아니라 철손 성분을 포함하는 전류가 된다. 반면 철손 저항의 직렬 모델링은 입력 전류가 유효한 축 토크를 얻는데 모두 인가 되므로 입력 전류를 제어함으로써 출력 토크 제어가 용이하다. 따라서 IPMSM의 전류 위상제어에서는 철손 저항의 병렬 모델링이 제어에 효과적이라 할 수 있다.

### 1. 서 론

매입형 영구자석 동기 전동기 (IPMSM)은 높은 출력 밀도, 효율, 넓은 운전 영역 등의 장점으로 다양한 분야에 적용 범위를 넓혀 가고 있다. IPMSM의 여러 특징 중 SPMSM에 비해 높고 회전자 위치에 따라 변화하며 비선형적인 인덕턴스는 시뮬레이션을 통한 정확한 특성 예측을 어렵게 만들고 있다. 특히 인덕턴스 산정에서 비선형적인 자기회로의 포화 특성과 회전자 위치에 따른 자기저항의 변화를 정확히 고려하기 위해 유한요소 해석이 일반적으로 사용되며 충분한 개수의 전류와 전류 위상에 따른 인덕턴스를 얻기 위해서는 엄청난 양의 해석을 필요로 한다.

동작 상태에서 인덕턴스의 측정은 철손, 동손, 기계손 등 다양한 손실을 포함하므로 실험으로 산정된 인덕턴스는 손실에 의한 영향을 배제해야 FEA로 산정된 인덕턴스와 비교할 수 있다. 정확한 인덕턴스의 산정 및 측정은 전동기 설계의 신뢰성 확보에 필수적이며 특히 IPMSM은 인덕턴스에 따른 운전 특성이 크게 변화하므로 신뢰성 있는 인덕턴스 평가가 필요하다.

본 논문에서는 정확한 인덕턴스의 실험적 산정을 위하여 우선 대상 전동기의 철손과 기계손을 분리 하였다. 이후 일정 속도에서 전류와 전류 위상에 따른 인덕턴스를 실험적으로 산정 하였다. 다음 단계로 실험 조건과 동일한 입력 전류 조건으로 2차원 유한요소 해석을 수행하여 인덕턴스를 산정하여 실험으로 산정한 결과와 비교 하였다. 그 결과 상당한 오차를 나타내었다. 인덕턴스 산정 시험상의 오차 요인으로는 부하시 전류의 고조파, 스위칭 소자의 스위칭 주파수, 역기전력의 고조파, DC 링크 전압의 변동, 철손, 기계손 등이 있다. 수행된 실험에서는 다양한 인덕턴스 산정 오차요인들 중 철손을 제외한 다른 요인들을 배제할 수 있는 여건에서 수행 되었다. FEA로 산정된 인덕턴스와 실험으로 산정된 인덕턴스를 비교하기 위해 등가회로의 철손 저항 모델링에 따라 인덕턴스 산정 시 철손의 영향을 배제하여 FEA로 산정된 인덕턴스와 실험으로 구한 인덕턴스의 비교로 본 논문에서 제시한 방법의 타당성을 검증 하였다.

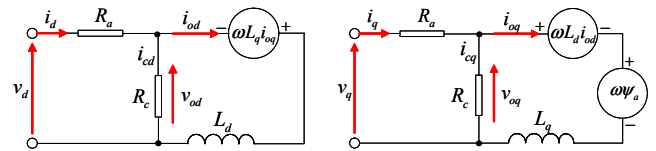
### 2. 본 론

#### 2.1 철손을 고려한 IPMSM의 d-q축 등가회로 모델링

철손을 고려한 인덕턴스 산정은 철손의 모델링에 따라 바뀌게 되므로 본 논문에서는 철손 저항을 병렬로 모델링 한 경우와 직렬로 모델링 한 경우로 나누어서 인덕턴스를 실험적으로 산정 하였다.

철손저항철손을 고려한 IPMSM의 d-q축 등가회로는 일반적으로 철손 저항( $R_c$ )이 입력단과 병렬 모델링 된 그림 1이 사용된다. 그림 1의 전압 방정식은 식 (1), (2)와 같다. 병렬 모델에서 철손은 철손 저항  $R_c$ 와 철손 전류( $i_{cd}$ ,  $i_{cq}$ )로 모델링되며 철손의 영향을 제외한 인덕턴스 산정은 식 (3)과 같다.

일부 연구에서 철손 저항의 직렬 모델링이 제안되었으며 그림 2에 나

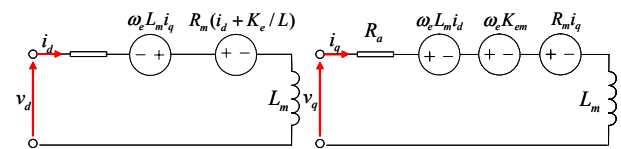


〈그림 1〉 d-q축 등가회로(병렬 철손저항)

$$v_d = R_a i_{od} + \left(1 + \frac{R_a}{R_c}\right) (\omega_e L_q i_{oq}) + p L_d i_{od} \quad (1)$$

$$v_q = R_a i_{oq} + \left(1 + \frac{R_a}{R_c}\right) v_{oq} + p L_q i_{oq} \quad (2)$$

$$L_d = \frac{v_q - i_{oq} R_a}{\omega_e \cdot i_{od}}, \quad L_q = \frac{v_d - i_{od} R_a}{-\omega_e \cdot i_{oq}} \quad (3)$$



〈그림 2〉 d-q축 등가회로(직렬 철손저항)

$$v_d = (R + R_m) i_d + p(L i_d + \frac{R_m}{\omega_e} i_q) - \omega_e (L i_q - \frac{R_m K_e}{\omega_e L}) \quad (4)$$

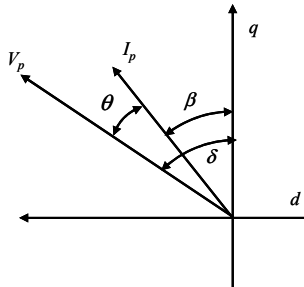
$$v_q = (R + R_m) i_q + p(L i_q - \frac{R_m}{\omega_e} i_d) + \omega_e (L i_d + K_e) \quad (5)$$

$$L_d = \frac{v_q - i_q R_a - \omega_e \cdot \psi_a}{\omega_e \cdot i_d}, \quad L_q = \frac{v_{od}}{-\omega_e \cdot i_q} \quad (6)$$

#### 2.2 인덕턴스 산정 방법

FEA를 이용한 인덕턴스 산정은 무부하 쇠교 자속과 부하 상태의 기본 쇠교 자속, 이때의 입력 전류를 이용하여 산정 하였다.[1] 인덕턴스의 측정은 1상 여자를 이용한 AC stand still 테스트, 부하시 전류 벡터제어의 파라미터를 이용한 인덕턴스 측정 방법 등이 있다. AC stand still 테스트는 실제 부하 상태에서 이루어지지 않으므로 출력 계

산에 적용하기에 정밀도의 문제가 있다. 부하시 전류 벡터 제어 파라미터를 이용하는 방법은 부하 상태에서 측정 하므로 실제적인 인덕턴스라 할 수 있다. 그러나, 전류 벡터 제어시 제어기에서 얻는 전압은 높은 고조파를 함유 하고 있으므로 기본과 성분의 크기와 위상을 정확히 계산하기가 어렵다. 본 논문에서는 전력 분석기, 오실로스코프, 제어기의 지령 전류를 이용하여 전류와 전류 위상에 따른 인덕턴스를 계산 하였다. 정상 상태에서 d-q축 벡터도는 그림 3과 같으며,  $V_p, I_p, \theta, \beta, \delta$ 는 각각, 상전압, 상전류, 역율, 전류 위상, 부하각을 나타내며 각각의 정보로부터 d-q축 전압, 전류 파라미터가 결정 된다. 이때 전력 분석기로 전압과 전류의 기본파만을 측정 하였다.



〈그림 3〉 인덕턴스 산정을 위한 벡터도

$$V_d = -V_a \sin \delta, \quad V_q = V_a \cos \delta \quad (7)$$

$$V_{od} = V_d - i_d R_a, \quad V_{oq} = V_q - i_q R_a \quad (8)$$

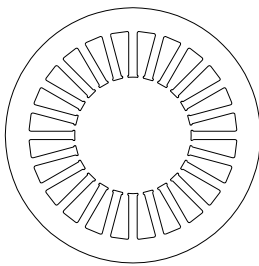
## 2.3 인덕턴스 측정 및 비교

### 2.3.1 대상 모델

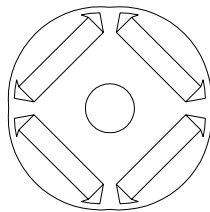
표 1은 대상 전동기의 주요 사양 및 파라미터를 나타내며 형상은 그림 4와 같다. 대상 전동기는 공작기계 스펀들 구동용 전동기로서 40,000rpm의 최대 속도를 갖는다. 4극 24슬롯의 분포권 타입으로 회전자는 역기전력 THD 저감 및 토크 리플 저감을 위해 표면에 편심이 적용 되었다.

〈표 1〉 대상 전동기의 주요 사양 및 파라미터

정격 출력 (W)	2000	공극 길이(mm)	0.8
극수/슬롯수	4/24	영구자석 Br (T)	1.2
적층 길이 (mm)	34	상저항(mΩ)	99.5
고정자/회전자 외경 (mm)	79/34.4	$\Psi_a$ (Wb)	0.0186



(a) 고정자 형상



(b) 회전자 형상

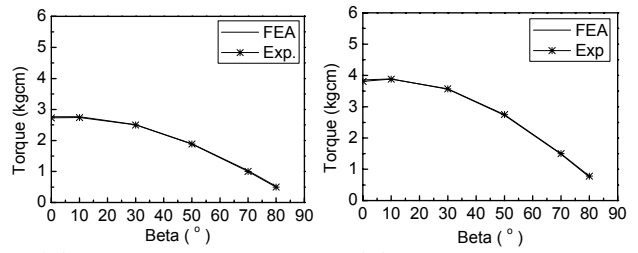
〈그림 4〉 고정자, 회전자 형상

### 2.3.2 실험 결과 및 분석

전압의 측정 오차는 인덕턴스 산정에서 가장 중요한 요소이다. 부하 시험은 150rpm의 저속에서 수행 되었으며 DC link 전압은 낮은 역기전력과 낮은 Modulation에 의한 전압 오차를 줄이기 위해 5V로 설정 하였다. 또한 전류 제어성을 확인하기 위해 각 전류 및 전류 위상 별로 엔코더의 신호와 전류 위상 관계를 확인 하여 실제 지령 전류가 정확히 인가됨을 확인 하였다. 착자되지 않은 회전자를 제작하여 철손과 기계손을 분리 하여 기계손은 150rpm에서 무시할 만한 수준이다.

그림 5는 전류와 전류 위상에 따른 부하 시험 결과 얻은 전류를 이용하여 FEA를 수행 하여 토크를 비교하였다. 그림 5에서 전류와 전류 위상에 따른 토크는 해석치와 실험치에서 동일하게 나타났으며 전류 위상 제어가 정확히 이루어진 것으로 판단된다. 또한 철손이 전류로 빠져

나간다면 동일 전류에서 손실이 포함되지 않은 FEA의 토크가 더 크게 나타나야하는데, 거의 동일한 토크가 나타남은 철손이 전류로 빠져나가지 않았음을 시사한다.



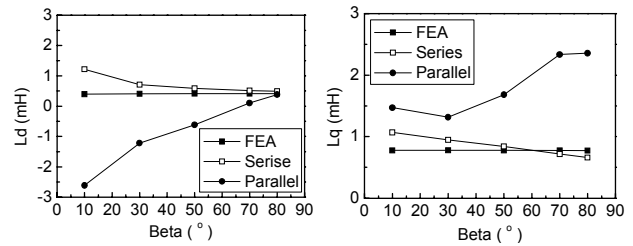
(a) 입력 전류 : 5Arms

(b) 입력 전류 : 7Arms

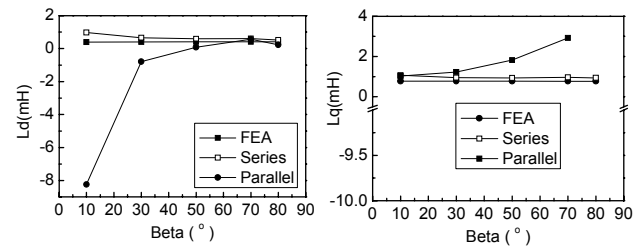
〈그림 5〉 전류와 전류위상에 따른 토크 비교(FEA Vs. Exp.)

### 2.3.3 등가회로 모델링에 따른 인덕턴스 계산결과 비교

그림 7은 철손 저항이 병렬, 직렬로 모델링 되었을 때와 FEA의 비교를 나타낸다. 철손 저항을 병렬로 모델링 한 경우는 식 (3)을, 직렬로 모델링 한 경우는 식(6)을 이용하였다. 철손 저항을 병렬로 연결 할 경우 음의 d축 인덕턴스가 나타났으며 물리적으로 타당하지 않는 결과이다. 반면 철손 저항을 직렬로 모델링 한 경우 FEA로 산정한 결과에 근접하는 결과를 얻었다.



〈그림 6〉 인덕턴스 비교 (FEA, 직렬 모델링, 병렬 모델링) : 5Arms



〈그림 7〉 인덕턴스 비교 (FEA, 직렬 모델링, 병렬 모델링) : 7Arms

## 3. 결 론

본 논문에서는 저속에서 IPMSM의 인덕턴스 측정과 FEA와의 비교 하여 저속에서 철손을 고려하는 방법을 나타내었다. 저속에서 철손을 고려한 인덕턴스 측정 결과 일반적으로 사용되는 병렬 철손 저항 모델로 물리적으로 설명하기 힘든 음의 인덕턴스를 갖는 결과를 얻었다. 직렬 철손 저항이 FEA로 산정된 인덕턴스에 가까운 결과를 얻을 수 있었으며 이러한 결과는 속도, 부하, Modulation, 등에 영향을 받을 수 있을 것으로 판단 되며 향후에는 동작 속도 증가에 따른 인덕턴스를 산정하여 속도에 따른 철손의 인덕턴스 산정에 대한 영향을 평가하고 모델링 할 계획이다.

## [참 고 문 헌]

- [1] 武田洋次, 森本茂雄, 本田幸夫, "영구자석 동기 모터의 설계와 제어", Ohmsha, 2001.
- [2] Ji-Young Lee, Sang-Ho Lee, Guen-Ho Lee, Jung-Pyo Hong, Jin Hur, "Determination of Parameters Considering Magnetic Nonlinearity in an Interior Permanent Magnet Synchronous Motor", IEEE Trans. on Magn., vol. 42, no. 4, April 2006.
- [3] N. Urasaki, T. Senjyu, K. Uezato, "Relationship of Parallel Model and Series Model for Permanent Magnet Synchronous Motors Taking Iron Loss Into Account", IEEE Trns. on Energy Conv.vol. 19, no. 2, 2004.