

매입형 영구자석 동기전동기의 인덕턴스 해석 및 실험적 검증

장석영\*, 황선익\*, 성소영\*\*, 최장영\*, 한상철\*\*\*, 구철수\*\*\*\*  
 충남대\* 한국해양연구원\*\*, 전력연구원\*\*\*, 한국원자력안전기술원\*\*\*\*

Analysis of Inductance and Experimental Validation of Interior Permanent Magnet Synchronous Motor

Seok-Myeong Jang\*, Seon-Ik Hwang\*, So-Young Sung\*\*, Jang-Young Choi\*, Sang-Chul Han\*\*\*, Cheol-Soo Goo\*\*\*\*  
 Chungnam National University\*, Korea Ocean Research & Development Institute\*\*, Korea Electric Power Research Institute\*\*\*,  
 Korea Institute of Nuclear Safety\*\*\*\*

**Abstract** - This paper deals with analysis of *d*, *q*-axis inductance and experimental validation of interior permanent magnet synchronous motor (IPMSM). Using AC standstill test, *d*, *q*-axis inductances are obtained in each current value. In these results are compared and analyzed with 2-d finite element analysis (FEA) to validate this paper.

1. 서 론

매입형 영구자석 동기전동기는 릴럭턴스 토크와 마그네틱 토크를 동시에 이용하기 때문에 고토크 및 고효율 특성을 가지고 있어 컴프레서, 스피들과 전기자동차 등에 이용되고 있으며, 그 응용분야가 점차 확대되고 있다. 매입형 영구자석 동기전동기는 표면부착형 영구자석 동기전동기보다 큰 공간고조파와 강한 자기적 비선형성을 가지고 있어 효과적인 구동을 위해서는 역기전력 상수나 인덕턴스와 같은 회로정수에 대한 예측 및 이를 고려한 성능 특성 해석이 필수적이다. [1]

매입형 영구자석 동기전동기의 성능에 직결되는 회로정수는 무부하시 쇄교자속,  $L_d$ (*q*축 인덕턴스)와  $L_q$ (*d*축 인덕턴스)이다.  $L_d$ 와  $L_q$ 를 구하는 방법에는 크게 유한요소법에 의한 방법과 실험에 의한 방법이 있다. 유한 요소법에 의한 방법은 부하시와 무부하시의 쇄교자속의 기본과 성분의 위상차를 구하고, 이 위상차와 부하시와 무부하시 쇄교자속 값을 이용하여 인덕턴스를 구하는 방법으로, 매입형 영구자석 동기전동기의 회로를 고려한 해석이 가능하며, 설계 시에 성능 예측이 가능하다는 장점이 있다. 실험에 의한 인덕턴스 측정법에는 정지 상태 시험법과 운전 상태 시험법이 있다. 운전 상태 시험법에는 발전시험법과 백터전류제어 시험법 등이 있다. 발전시험법은 백터제어 인버터를 사용하지 않고 다이 나모미터를 이용하여 매입형 영구자석 동기전동기의 회전자를 회전시켜 출력되는 역기전력을 이용하여 인덕턴스를 측정하는 방법이고, 백터전류 제어 시험법은 백터제어 운전 시 사용하는 장비 외에 어떤 추가적인 장비도 필요하지 않다는 장점이 있다. 하지만 이 방법들은 철손의 영향이 크며 시험도 복잡하다. 정지 상태 시험법에는 직류 전류 시험법과 교류 정지 시험법 등이 있다. 직류 전류 감소법은 고정자의 임의의 상에 회전자 *d*축 또는 *q*축에 고정시키고, 상전류를 인가하고 상전류 값이 0으로 감소하는 것을 측정하여 인덕턴스 값을 측정하는 시험법이다. 교류 정지 시험법은 회전자를 *d*축 또는 *q*축에 고정시킨 후, 교류 전류를 인가하여 전압과 전류를 이용하여 임피던스를 구하고, 이를 통하여 인덕턴스를 구하는 방법이다. 정지 상태 시험법은 운전 상태 시험법에 비해 철손의 영향이 적고, 실험이 간단하다. 그러므로 본 논문에서는 교류 정지 시험법을 이용하여 인덕턴스를 구하였으며, [2]-[4] 유한요소법에 의하여 구한 값[5]과 비교 검토를 하였다.

2. 본 론

2.1 매입형 영구자석 동기전동기의 수학적 모델링

전기각속도  $\omega$ 로 회전하는 매입형 영구자석 동기전동기의 전압방정식은 식 (1)과 같이 표현할 수 있다.

$$\begin{bmatrix} v_d \\ v_q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R_s + pL_d & -\omega L_q \\ \omega L_d & R_s + pL_q \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_d \\ i_q \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ \omega \Psi_a \end{bmatrix} \quad (1)$$

여기서,  $v_d$ ,  $v_q$ 는 *d*축, *q*축 전기자 전압,  $i_d$ ,  $i_q$ 는 *d*축, *q*축 전기자 전류,  $R_s$ 는 전기자 저항,  $\Psi_a$ 는 전기자 쇄교자속이며,  $p$ 는 미분연산자이다. 식 (1)에서 우측의 첫 번째 행렬식은 전기자 권선에 의한 전압강하 성분이며, 두 번째 행렬은 영구자석의 전기자 쇄교자속에 의한 역기전력 성분으로 *q*축에서만 발생을 한다.

매입형 영구자석 동기전동기의 발생 토크는 영구자석에 의하여 발생되는 마그네틱 토크와 인덕턴스 차이에 의하여 발생하는 릴럭턴스 토크를 모두 가지고 있으므로, 총 발생 토크는 식 (2)와 같이 나타낼 수 있다.

$$T = P_n \Psi_a i_q + P_n (L_q - L_d) i_d i_q \quad (2)$$

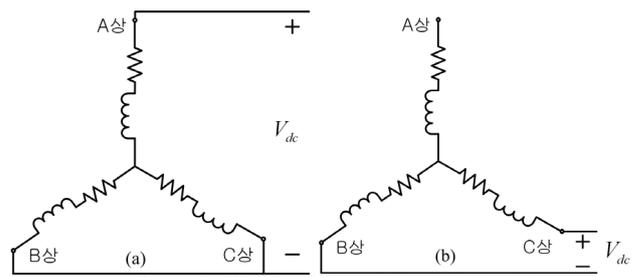
여기서,  $P_n$ 은 극쌍수이다.

여기서 식 (2)의 우측은 마그네틱 토크를 좌측은 릴럭턴스 토크를 나타낸다. 매입형 영구자석 동기전동기는  $L_q > L_d$ 의 역돌극성이 존재하므로, 음의 *d*축 전류를 인가하게 되면, 릴럭턴스 토크를 얻게 되므로 표면부착형 영구자석 동기전동기에 비해 더 큰 토크를 얻을 수 있다. 그러나 이 때 음의 *d*축 전류에 의한 *d*축 전기자 반작용 자속이 영구자석을 감자시키므로 영구자석의 불가역 감자에 주의해야 된다.

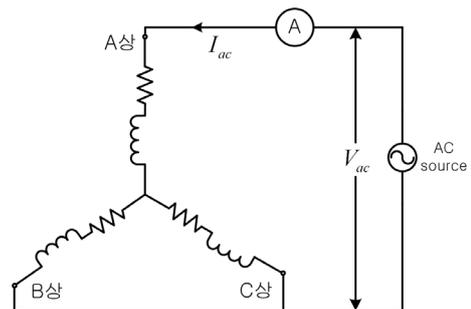
2.2 교류 정지 시험법

매입형 영구자석 동기전동기의 인덕턴스 측정 방법에는 여러 가지 방법이 있지만, 본 논문에서는 철손의 영향이 적고 실험이 간단한 교류 정지 시험법을 이용하여 인덕턴스를 측정하였다. [3],[4] 교류 정지 시험법을 이용한 인덕턴스의 측정은 다음과 같은 순서로 구할 수 있다.

- ① 그림 1과 같은 방법을 이용하여 매입형 영구자석 동기 전동기의 회전자를 *d*축 또는 *q*축에 정렬을 시킨다.
- ② 회전자를 *d*축에 정렬시켰을 때와 *q*축에 정렬시켰을 때 각각의 경우에 대하여 그림 2와 같이 실험세트를 구성한 후 전압의 크기를 변화시키며 전류 값을 측정한다.
- ③ ②번 과정으로부터 구한 전압과 전류를 식 (3)~(5)를 이용하여 *d*축과 *q*축 인덕턴스를 산출한다.



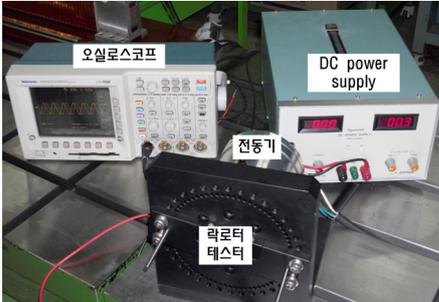
〈그림 1〉 매입형 영구자석 동기전동기의 축 정렬 (a)*d*축 정렬, (b)*q*축 정렬



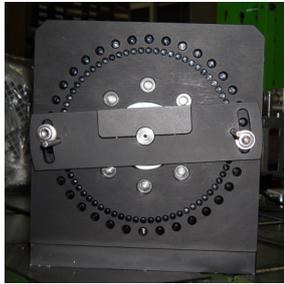
〈그림 2〉 교류 정지 시험법 실험 구성

〈표 1〉 전동기 사양

항목	사양 [단위]
고정자 외경	100 [mm]
회전자 외경	54 [mm]
정격속도	6540 [rpm]
극수	6
슬롯수	9



〈그림 3〉 교류 정지 시험법 실험 구성



〈그림 4〉 락로터 테스트

교류정지 시험법에서는 회전자가 회전하지 않으므로 식 (1)의  $w$ 는 0이다. 그러므로 회전자를 d축에 고정시킨 후, 전압을 인가하였을 경우 d축 전압과 전류에 영향을 미치는 임피던스 성분은 전기자 저항과 d축 인덕턴스이다. 이와 마찬가지로 회전자를 q축에 정렬을 시키고, q축에만 전압을 인가하였을 경우, q축 전류를 흐르게 하는 임피던스 성분은 전기자 저항과 q축 인덕턴스이다. 전기자 저항은 멀티미터를 이용하여 구할 수 있으므로, 식 (3)~(5)을 이용하여  $L_d$ 와  $L_q$ 를 구할 수 있다.

$$Z = \frac{I_{ac}}{V_{ac}} \quad (3)$$

$$(1.5X)^2 = Z^2 - (1.5R)^2 \quad (4)$$

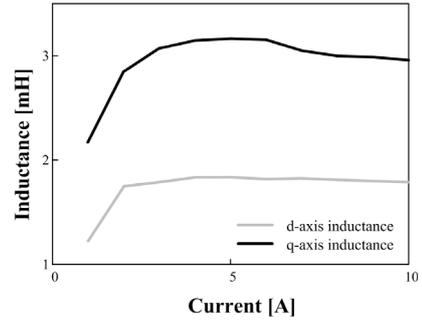
$$L_{dq} = \frac{X}{2\pi f} \quad (5)$$

여기서,  $V_{ac}$ 는 인가전압,  $I_{ac}$ 는 선간전류,  $Z$ 는 임피던스,  $R$ 은 전기자 상 저항,  $L_{dq}$ 는 인덕턴스 값이다.

### 2.3 해석 결과

표 1은 본 논문에서 사용된 매입형 영구자석 동기전동기의 주요 사양이며, 그림 3은 교류정지 시험법을 적용하기 위한 실험 세트이다. 그림에서 보이는 DC power supply를 이용하여 매입형 영구자석 동기전동기를 그림 1과 같이 결선을 하여 d축 또는 q축을 찾은 후, 그림 4의 락로터 테스트를 이용하여 샤프트를 고정을 시킨다. 고정을 시킨 후 그림 2와 같이 결선을 하고 AC power supply를 이용하여 이 전동기에 전압을 인가를 하며 이 때의 주파수는 정격주파수인 327 [Hz]로 하였다. 인덕턴스의 값은 주파수에 따라 변화는 값이 아니므로, 주파수를 가변하며 실험은 하지 않았다. 이 전압을 인가를 해주었을 때, 전류는 오실로스코프를 사용하여 측정을 하고, 이 때의 전압과 전류 값을 이용하여 식 (3)~(5)를 이용하여 임피던스의 값을 구할 수 있고, 이를 이용하여 인덕턴스의 값을 계산을 한다.

그림 5는 교류 정지 시험법을 이용하여 구한  $L_d$ 와  $L_q$ 를 나타낸 것이다.  $1[A_{peak}]$ 의 전류가 흐를 경우,  $L_d$ 와  $L_q$ 값 모두 다른 값들과는 다른 양상을 보이고 있다. 이러한 이유는 낮은 전류에서는 자기 포화가 일어나지 않으므로 정상적인 값을 갖지 못하기 때문이다. 그 영역을 제외하



〈그림 5〉 교류 정지 시험법의 d축, q축 인덕턴스

〈표 2〉 인덕턴스 측정 결과 비교

전류	인덕턴스	유한요소법	교류정지시험법	오차 [%]
5A	Ld [mH]	1.84	1.83	0.54
	Lq [mH]	3.52	3.17	11.04
10A	Ld [mH]	1.85	1.79	3.35
	Lq [mH]	3.09	2.96	4.39

면  $L_d$ 는 거의 일정한 값을 가지고 있으며,  $L_q$ 는  $6[A_{peak}]$ 까지는 증가를 하다가  $7[A_{peak}]$ 가 넘어가면서 갑자기 떨어짐을 확인할 수 있다. 보통 교류 정지 시험법에서 주요한 실험상의 오차는 인가 전압의 왜곡과 철손의 영향 때문인데, 특히 철손의 경우 회전자가 구속되어 있기 때문에 실제 구동 될 때에는 다르게 회전자 측에서도 철손이 발생하게 되므로 약간의 오차가 있다. [4]

유한요소법을 이용하여 인덕턴스를 구하기 위해서는 매입형 영구자석 전동기의 부하시 쇄교자속과 무부하시 쇄교자속을 각각 구한다. 그리고 이 파형들의 고조파 성분들을 제거를 한 후 기본파 성분만을 이용하여 두 파형 사이의 위상차를 구한다. 그리고 부하시 및 무부하시 쇄교자속 사이의 위상차, 부하시 및 무부하시 쇄교자속, 인가전류와 부하각을 이용하여  $L_d$ 와  $L_q$ 를 구할 수 있다 [5].

표 2는 이렇게 구한 유한요소법 결과와 교류 정지 시험법을 통하여 구한 결과를 비교한 것이다. 전류  $5[A_{peak}]$  인가 시  $L_d$  값은 오차가 크지 않았다. 하지만  $L_q$ 의 경우는 11[%] 정도의 오차가 발생을 하였다.  $10[A_{peak}]$ 를 인가하였을 경우는  $L_d$ 는 3[%] 정도의 오차가 발생을 하였고,  $L_q$ 의 경우는 4[%] 정도의 오차가 발생을 하였다.

### 3. 결 론

매입형 영구자석 동기전동기는 고효율 및 고품질 특성을 가지고 있어 여러 분야에 활용되고 있으며 그 응용분야를 넓혀가고 있다. 하지만 표면부착형 영구자석 전동기에 비해 강한 자기적 비선형성을 가지고 있기 때문에 효과적인 구동을 위해서는 무부하 쇄교자속 및 인덕턴스의 정확한 해석이 필수적이다. 그러므로 본 논문에서는 교류 정지 시험법을 이용하여 매입형 영구자석 동기전동기의 성능에 직결이 되는 d축과 q축의 인덕턴스를 전류에 따라 구하였다. 그리고 이를 유한요소법을 이용하여 구한 값과 비교하고 이를 분석을 하였다. 향후 논문에서는 도출된 파라미터들을 토대로 매입형 영구자석 동기전동기의 정특성 해석을 수행할 것이다.

### [참 고 문 헌]

[1] H. Goto, K. kimura, H. Guo, and O. Inhinokura, "Simulation of IPM Motor by Nonlinear Magnetic Circuit Model for Comparing Direct Torque Control with Current Vector Control," Power Electronics and Motion Control Conference, pp1168-1172, 2008  
 [2] 최홍순 "비선형 효과를 고려한 IPM형 전동기의 DQ축 인덕턴스 및 역기전력 상수 파라미터 추출" 전기학회논문지, Vol. 56, No. 3, 2007, pp. 519-523  
 [3] 김승주, 김철진, 이주 "매입형 영구자석 동기전동기의 인덕턴스 측정법 비교 분석" 전기학회논문지, Vol. 58, No. 5, 2009, pp. 923-928  
 [4] 윤준보, 김숙, 임진재, 이문주, 이주 "교류정지시험법을 이용한 동기형 락로터 전동기의 직접토크제어 특성 연구", 대한전기학회 춘계학술대회 논문집, 2003, pp. 56-58  
 [5] 장성명, 황선익, 박유섭, 최장영, 서진호 "매입형 영구자석 동기전동기의 d, q축 인덕턴스 도출 및 토크 산출" 춘계학술대회 논문집, 2010, pp. 33-35