

IPM의 자체 Cross-Coupling 특성에 관한 연구

곽상엽, 김재광, 정현교  
서울대학교 전기역학 연구실

Characteristic Analysis of Interior Permanent Magnet Motor considering Cross-Coupling Effect

Sang-Yeop Kwak, Jae-Kwang Kim, Hyun-kyo Jung  
Seoul National University, Electromechanics Laboratory

**Abstract** - 본 논문에서는 영구자석 기기에서 발생하는 d-q축간의 상호 포화(cross saturation) 문제에 대해 다루었고, 이를 고려한 d축과 q축의 전류에 따른 전동기의 특성값을 수치 해석적으로 도출하는 방법을 제시하였다. 아울러 다층 회전자 구조를 지닌 매입형 영구자석 전동기(multi-layer buried magnet synchronous motor)의 d축 및 q축 인덕턴스 값을 교차 결합 특성(Cross-Coupling)을 고려하여 수치 해석적 기법을 통해 도출하였으며, 실험값과의 비교를 통해서 기존의 해석 방법보다 우수함을 입증하였다.

것인데, 이를 통해 표면 부착형 영구자석 전동기에서 발생하는 고속 운전시의 기계적 취약성을 극복할 수 있으며, 자석이 회전자 내부에 있어 고정자 권선에서 발생하는 열의 영향을 직접적으로 받지 않아 보다 열악한 환경에서도 운전이 가능하다. 또한 유효 공극을 작게 할 수 있는 장점이 있어 전기자 반작용 효과가 현저하여 약계자 제어가 가능하며, 광범위한 운전 속도에서 일정 출력 운전 영역이 가능하다.

1. 서 론

최근 높은 효율과 광범위한 속도 영역에서의 약계자 운전 영역을 얻기 위해 회전자의 인덕턴스 분포 차이, 즉 큰 돌극성을 가지는 전동기의 응용 분야가 확대 되고 있다. 일반적으로 매입형 영구자석 전동기는 회전자의 돌극성으로 인해 q축 인덕턴스가 d축 인덕턴스보다 큰 특성을 보인다. 또한 q축 인덕턴스는 q축 전류의 증가에 따른 철심의 자기 포화로 인해 점차 그 크기가 감소하는 경향을 보인다. 하지만, q축 인덕턴스는 d축 전류의 증가에 따라서도 그 값이 현저히 감소하며, 이것은 d축 전류의 증가에 따라 철심이 포화되면서 q축 자속의 통로도 포화되어 발생하는 상호 포화(cross saturation)에 의한 것으로 d축 인덕턴스에서도 나타나는 현상이다. 따라서 큰 돌극성을 가지는 매입형 다층 영구자석 교류 전동기의 가장 중요한 장점인 광범위한 고속 운전을 위해서는 효과적인 약계자 제어가 필수적이며 이를 위해서는 기기 설계시 d축 인덕턴스와 q축 인덕턴스의 정확한 예측이 필요하다 [1]-[3].

본 논문에서는 영구자석 기기에서 발생하는 d-q축간의 cross saturation 문제에 대해 자세히 설명하였고, 이를 고려한 d축과 q축의 전류에 따른 전동기의 특성값을 수치 해석적으로 도출하는 방법을 제시하였다. 아울러 본 논문에서 제안한 수치 해석적 방법을 통해 다층 회전자 구조를 지닌 매입형 영구자석 전동기(multi-layer buried magnet machine)의 d-q축 인덕턴스 값을 교차 결합(Cross-Coupling) 특성을 고려하여 도출하였으며 실험 값과의 비교를 통해서 타당성을 입증하였다.

2. 해석 모델 및 능력 곡선

효율(Efficiency), 속도성(Dynamic Performance), 그리고 파워 밀도(Power Density)등이 높은 영구 자석형 전동기의 특성과, 공극 방향에 대해 인덕턴스의 공간적인 비 대칭성 즉 돌극성을 가지고 있어 회전자 자속과 고정자 전류의 상호 작용 토크(Field Torque)와 자기 저항(Reluctance)의 차이에 의한 토크(Reluctance Torque)가 동시에 발생하는 동기형 리터턴스 토크(Synchronous Reluctance Motor)의 특성과 가지는 전동기가 다층 매입형 영구자석 전동기(multi-layer buried magnet machine)이다. 이것은 영구자석을 회전자 내부에 매입한

표1. 해석 모델의 주요 설계값

변수명	변수값
극수	8
회전자 외경	200 mm
회전자 내경	116.2 mm
공극	0.7 mm
고정자 내경	201.4 mm
고정자 외경	270 mm
축방향 길이	70 mm
슬롯 수	48
영구자석 재질	페라이트(Br=3700Gauss)
역기전력 상수	0.01226 V <sub>peak</sub> /rad/sec
상당 권선 저항	8.4 mΩ

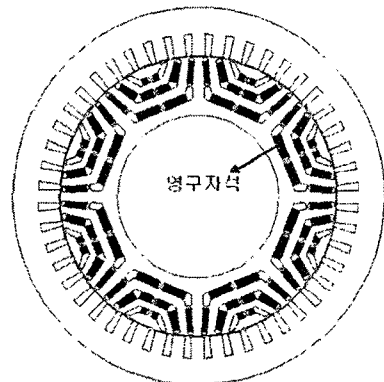


그림1. 해석 모델의 단면 구조

표 1.에서는 해석 모델의 주요 설계 값을, 그림 1.에서는 해석 모델의 단면 구조를 나타내었다 [1]. 돌극성을 최대한 키우기 위해 위와 같은 회전자 구조를 가지고, 인덕턴스가 작은 d축에 약한 페라이트 자석을 매입하여 d축 자속을 상쇄하였다. 또한, 정현파에 가까운 역기전력 파형이 나오게 하기 위해 각 층마다 부분적으로 자석을 매입하였다.

그림 2.에서는 매입형 영구자석 전동기의 능력 곡선(Capability Curve)을 나타내었다. 기저속도(정격속도)이상에서 속도에 비례하여 공극 자속의 크기를 줄이는 약

제자 제어를 행하면 제한된 단자 전압과 단자 전류하에서 전동기가 발생할 수 있는 광범위한 정출력 영역(=약 제자 영역)을 확보할 수 있다.

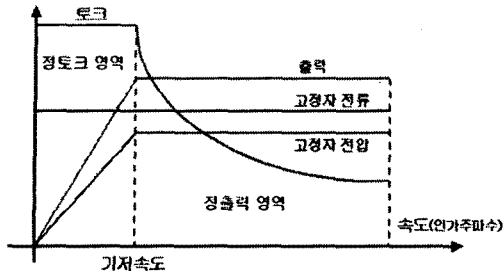


그림2. 능력 곡선(Capability Curve)

### 3. 인덕턴스 특성

3상 영구자석형 동기기의 고정자 각 상의 자기 인덕턴스는 회전자 위치의 회전자 위치에 따라서 변화하는 양으로서 항상 양수이며, 각 상의 축이 회전자의 q축과 일치할 때 가장 크고 d축과 일치할 때 가장 작다. 그 분포를 정현적인 것으로 가정하고 누설 자속을 무시하면, 각각의 값은 다음과 같다 [4].

$$L_{aa} = L_0 - L_2 \cos 2\theta_r \quad (1)$$

$$L_{bb} = L_0 - L_2 \cos(2\theta_r + 2\pi/3) \quad (2)$$

$$L_{cc} = L_0 - L_2 \cos(2\theta_r - 2\pi/3) \quad (3)$$

여기서,  $\theta_r$ : 회전자의 전기각 변위

$L_0$ : 각 상의 자기 인덕턴스 평균값

$L_2$ : 각 상의 자기 인덕턴스 변화폭의 1/2

그리고, d축, q축 인덕턴스는 다음과 같이 정의된다.

$$L_{ds} = \frac{3}{2}(L_0 - L_2) \quad (4)$$

$$L_{qs} = \frac{3}{2}(L_0 + L_2) \quad (5)$$

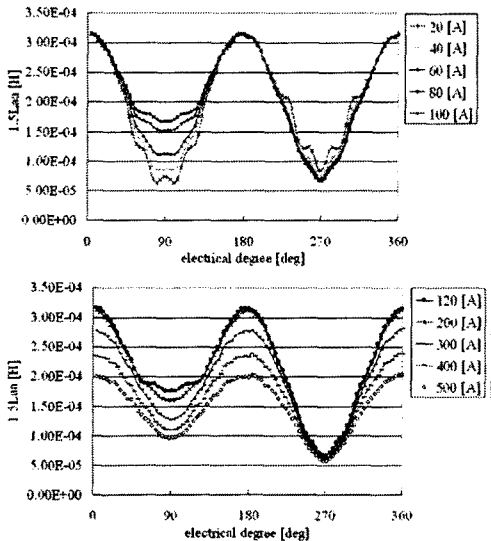


그림3. 해석모델의 a상 자기 인덕턴스 (by FEM)

그림 3.에서는 해석 모델의 a상 자기 인덕턴스를 나타내었는데 인덕턴스 변화가 정현적이지 않으며, 고정자 전류에 따라 인덕턴스 변화 양상이 달라짐을 알 수 있다. 또한 대전류 인가시 철심의 포화로 인해 인덕턴스 값이 작아지고 있으며, 회전자 위치에 따른 복잡한 포화 특성에 대한 고려가 필요함을 알 수 있다.

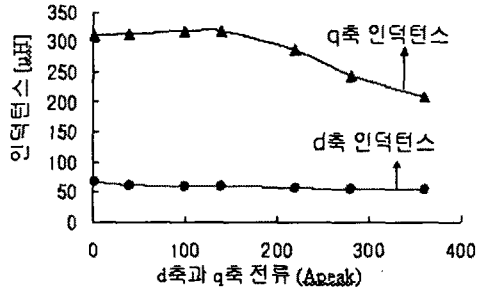


그림4. FEM으로 계산한 해석 모델의 d-q축 인덕턴스

그림 4.에서는 기존의 FEM 해석 방법에 의해 계산된 해석 모델의 d축과 q축의 인덕턴스 값을 나타내었다. 그림 3.에서 전류값이 증가함에 따라 인덕턴스 값이 작아지는 현상을 그림 4.에서도 확인할 수 있으며 이는 기존의 해석 방법이 철심의 포화 특성을 고려하고 있음을 나타내고 있다.

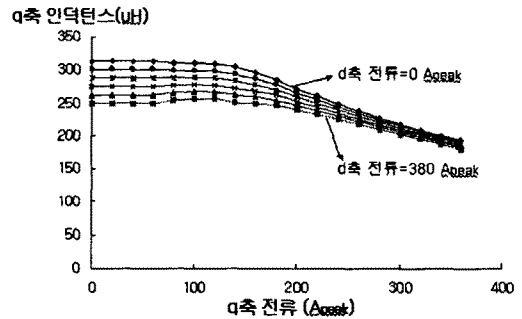


그림5. 실험으로 측정된 q축 인덕턴스

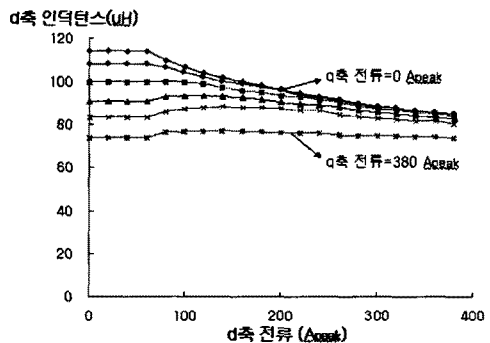


그림6. 실험으로 측정된 d축 인덕턴스

그림 5.에서는 실험으로 측정된 q축 인덕턴스를 나타내었다. d축 전류에 따라 여러 그래프들을 보여주고 있는데 d축 전류의 증가에 따라 q축 인덕턴스가 현저히 작아지는 것을 알 수 있다. 이것은 d축 전류의 증가에 따라 전동기가 자기적으로 포화되면서 동시에 q축 자로도 포화

되어 발생하는 상호 포화(Cross Saturation)현상에 의한 것으로, 그림 6.에서 나타내었듯이 d축 인덕턴스는 상호 포화에 의해 그 변화폭이 더 커짐을 알 수 있다. 하지만 그림 4.의 계산된 d축과 q축의 인덕턴스 값들은 다른 축 전류에 의한 포화 효과를 무시하고 있으며 실험 값과의 차이가 크다. 이는 기존의 FEM 해석 방법이 포화가 심하게 발생하는 전동기의 정확한 인덕턴스값을 계산하지 못하고 있음을 보여주고 있다.

#### 4. 제안된 새로운 해석 방법

기존의 해석 방법에서는 d축과 q축의 인덕턴스를 구하기 위해 다른 축의 전류값을 무시하였지만, 실제 전동기의 구동 상황에서는 d축과 q축의 전류가 동시에 존재한다. 따라서 전동기 수치 해석시 각 축의 전류가 다른 축의 인덕턴스에 영향을 주는 상호 결합(Cross Coupling) 현상을 고려해야 한다.

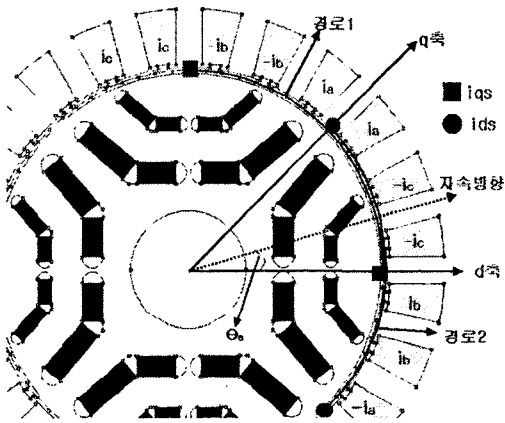


그림 7. 제안된 새로운 해석 방법

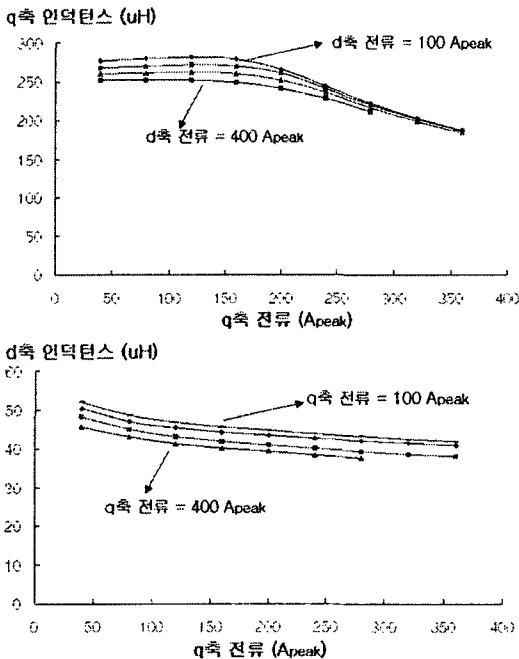


그림 8 제안된 해석 방법을 통해 계산된 해석 모델의 d축, q축 인덕턴스

그림 7.에서 제안된 새로운 해석 방법을 나타내었는데, 실제 구동 상황에서 고정자 전류에 의한 자속 방향이 그림에서와 같이 d축에 대하여 전기가  $\theta_a$ 만큼 떨어져 있다면 해당 자속을 만들기 위해 각 상당 인가해야 하는 전류값은 다음과 같다.

$$i_a = I_0 \cos \theta_a \quad (6)$$

$$i_b = I_0 \cos(\theta_a + 2\pi/3) \quad (7)$$

$$i_c = I_0 \cos(\theta_a - 2\pi/3) \quad (8)$$

이때의 d축과 q축의 전류값은 다음과 같다.

$$i_{ds} = I_0 \cos \theta_a \quad (9)$$

$$i_{qs} = I_0 \sin \theta_a \quad (10)$$

따라서, 경로 1을 통과하는 자속은 수식 (9)에서 나타낸 d축 전류가 만들어 내는 자속이 결합(coupling)된 q축 자속이 되고, 마찬가지로 경로 2를 통과하는 자속은 수식 (10)에서 나타낸 q축 전류가 만들어 내는 자속이 결합(coupling)된 d축 자속이 된다. 즉 제안된 해석 방법에서는 d축과 q축의 자속이 동 축의 전류값 뿐 아니라 다른 축 전류값에도 영향을 받는 값이 된다. 그림 8.에서는 위의 제안된 해석 방법을 통해 수치 해석적으로 계산된 해석 모델의 d축과 q축 인덕턴스를 나타내었다. 그림 4.에서 볼 수 없었던 상호 포화 현상이 잘 나타나고 있으며 변화 양상 또한 기존의 해석 방법보다 실험값에 근접함을 알 수 있다.

한편 그림 5.와 그림 6.에 나타난 실험값과 그림 8.에 나타난 새로운 해석값을 비교해보면 전체적으로 해석값이 실험값보다 작음을 알 수 있다. 표 1.에서 보듯이 본 해석 모델은 외경이 크고 축방향 길이가 작은 디스크 타입에 가까운 전동기이다. 따라서 엔드 권선에서 발생하는 누설 자속(end leakage flux)이 다른 전동기에 비해 클 것으로 예상되고 해석 시 이 성분을 정확히 고려한다면 좀 더 실험값에 근접한 결과를 얻으리라 판단된다. 하지만 실제 기기 성능에 미치는 영향은 d축과 q축의 인덕턴스 값 자체가 아니고 d축과 q축의 인덕턴스 차이 값이며, 실험값과 해석값의 비교에서 알 수 있듯이 그 오차는 수 %이내이므로, 본 논문에서 제안한 해석 방법을 통해서 기기 설계시 정확한 성능 예측이 가능하다고 하겠다.

#### 5. 결 론

본 논문에서는 영구자석 기기에서 발생하는 d-q축간의 cross saturation 문제에 대해 자세히 설명하였고, 이를 고려한 d축과 q축의 전류에 따른 전동기의 인덕턴스 값을 수치 해석적으로 도출하는 방법을 제시하였다. 아울러 다층 회전자구조를 지닌 매입형 영구자석 전동기의 d축 및 q축 인덕턴스 값을 교차 결합(Cross-Coupling) 특성을 고려하여 제안된 수치 해석적 기법을 통해 도출하였으며 실험값과의 비교를 통해서 제안된 해석 방법의 타당성을 검증하였다.

#### [참 고 문 헌]

- [1] 배본호, "큰 돌극성을 가진 영구 자석 교류 전동기의 제어에 대한 연구," 박사학위논문, 서울대학교 전기공학부, 2002
- [2] 설승기, "전기기기 제어론," 브레인 코리아, 2000
- [3] N. Bianchi, S. Bolognani, "Interior PM Synchronous Motor for High Performance Applications," PCC Osaka 2002, Proceedings of the, Vol.1, pp.148-153, 2002
- [4] P.C. Krause, "Analysis of Electric Machinery Chapter 3," McGraw Hill, 1987