

## 매입형 영구 자석 기기의 출력 특성에 관한 연구

서장호, 광상엽, 김재광, 정현교  
서울대학교 전기역학 연구실

### Power Estimation of Interior Permanent Magnet Machine

Jang-Ho Seo, Sang-Yeop Kwak, Jae-Kwang Kim, Hyun-Kyo Jung  
Electromechanics Laboratory, Seoul National University

**Abstract** - 본 논문에서는 수치 해석적인 방법으로 도출된 전동기 특성값을 이용하여, 다양한 속도 영역에서 매입형 영구 자석 기기의 최대 토크값과 최대 출력값을 도출하는 방법을 제시하였다. 실제 해석 결과를 통해 다층 회전자 구조를 지닌 매입형 영구자석 전동기(multi-layer buried magnet synchronous motor)의 넓은 영역에서의 정출력 구간을 확인할 수 있었으며 아울러, 실험값과의 비교를 통해 그 타당성을 검증하였다.

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 매입하였고, 누설 자속을 줄이고 고속 운전 영역에서의 원심력에 의한 회전자 파손을 방지하기 위하여 브릿지(bridge) 길이를 1mm로 제한하였다.

### 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 확대되고 있다. 일반적으로 매입형 영구자석 전동기는 회전자 자속과 고정자 전류의 상호 작용 토크(Field Torque)와 자기 저항(Reluctance)의 차이에 의한 토크(Reluctance Torque)가 동시에 발생하여 높은 기동 토크를 가질 수 있으며, 또한 기저속도(정격속도)이상에서 속도에 비례하여 공극 자속의 크기를 줄이는 약계자 제어를 행하면 제한된 단자 전압과 단자 전류 하에서 전동기가 발생할 수 있는 광범위한 정출력 영역(약계자 영역)을 확보할 수 있다 [1].

본 논문에서는 영구자석 기기에서 발생하는 d-q축간의 cross saturation 문제를 고려하여 d축과 q축의 전류에 따른 전동기의 특성값을 수치 해석적으로 계산하였고, 이를 이용하여 다양한 속도 영역에서 해석 모델의 능력 곡선(Capability Curve)을 도출하였다. 또한 고정투자율법을 적용하여 계산된 해석 결과와 실험값과의 비교를 통해 그 타당성을 검증하였다.

### 2. 해석 모델

효율(Efficiency), 속응성(Dynamic Performance), 그리고 파워 밀도(Power Density)등이 높은 영구 자석형 전동기의 특성과, 공극 방향에 대해 인덕턴스의 공간적인 비 대칭성 즉 돌극성을 가지고 있어 동기형 리터턴스 토크(Synchronous Reluctance Motor)의 특성도 가지는 전동기가 다층 매입형 영구자석 전동기(multi-layer buried magnet machine)이다. 이것은 영구자석을 회전자 내부에 매입한 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 전기가 반작용 효과가 현저하여 약계자 제어가 가능하며, 광범위한 운전 속도에서 일정 출력 운전 영역이 가능하다.

그림 1.에서는 해석 모델의 단면 구조를 나타내었다.

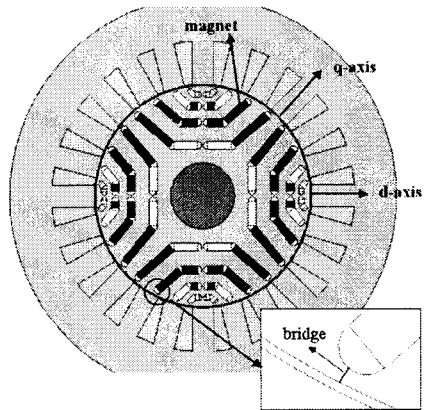


그림1. 해석 모델의 단면 구조

### 3. 인덕턴스 특성

돌극성이 큰 본 연구의 해석 모델의 경우, 리터턴스 토크를 충분히 이용하면서 전동기의 크기를 줄이기 위하여 자기적인 포화가 발생하는 영역까지를 운전 영역에 포함하였다. 따라서 전 운전영역에서의 d축과 q축 전류의 변화에 따른 d축, q축 인덕턴스의 비선형적 변화가 예상되며 설계시 토크와 출력의 추정과 약계자 운전을 위해서는 개별적 전류 조합에서의 정확한 파라미터 추출이 필수적이다.

매입형 영구자석 전동기의 토크식은 일반적으로 다음과 같다.

$$T_e = \frac{3}{2} \frac{P}{2} [K_{e1} i_{ds}^* (L_{ds} - L_{qs}) i_{qs}^*] \quad (1)$$

여기서,  $P$ : 극수 ; 역기전력 상수

$L_{ds}$ : d축 인덕턴스  $L_{qs}$ : q축 인덕턴스

$i_{ds}^*$ : d축 전류  $i_{qs}^*$ : q축 인덕턴스

위 식에서 토크는 역기전력 상수, 인덕턴스와 전류에 의해서 결정되는데 기동 토크의 경우 위식에서 두 번째 항이 첫 번째 항보다 훨씬 큰 값을 가지게 되므로 인덕

턴스와 전류의 영향이 중요하다. 이 때 전류는 정확한 측정이 비교적 손쉬운 편이지만 인덕턴스의 경우는 정밀한 측정이 쉽지 않다. 따라서 정확한 인덕턴스의 측정은 기기의 성능을 평가하는데 주요한 지표가 되며 이것은 출력을 계산하는 과정에 있어서도 동일하다.

이러한 이유로 인덕턴스는 기기 설계 단계에서 가장 중요한 설계 파라메터가 되기 때문에 본 논문에서는 기존의 수치 해석방법과 고정 투자율법을 적용한 수치 해석 방법을 통해 계산된 인덕턴스 값과 실험 결과를 비교하였다.

### 2.1 기존의 수치 해석 방법

일반적으로 매입형 영구자석 전동기에서 q축 인덕턴스는 q축 전류의 증가에 따른 철심의 자기 포화로 인해 점차 그 크기가 감소하는 경향을 보인다. 하지만, q축 인덕턴스는 d축 전류의 증가에 따라 철심이 포화되면서 q축 자속의 통로도 포화되어 발생하는 상호 포화(cross saturation)에 의한 것으로 d축 인덕턴스에서도 나타나는 현상이다 [2]. 따라서 광범위한 고속 운전 영역에서 효과적인 약계자 제어가 되기 위해서는 기기 설계시 이러한 상호 포화 현상을 고려하여 d축 인덕턴스와 q축 인덕턴스를 도출하여야 한다.

인덕턴스값은 전기자 전류만에 의한 자계 특성에서 구할 수 있으며 상호 포화 효과도 고려한 인덕턴스 계산 수식은 다음과 같다.

$$L_{ds}(i_{ds}^r, i_{qs}^r) = \frac{\lambda_d(i_{ds}^r, i_{qs}^r) - \lambda_{md}}{i_{ds}^r} \quad (2)$$

$$L_{qs}(i_{ds}^r, i_{qs}^r) = \frac{\lambda_q(i_{ds}^r, i_{qs}^r) - \lambda_{mq}}{i_{qs}^r} \quad (3)$$

여기서,  $\lambda_d$ ,  $\lambda_q$ 는 전류를 인가하였을 때 각 축 쇄교자속이고  $\lambda_{md}$ ,  $\lambda_{mq}$ 는 전류를 인가하지 않았을 때 각 축 쇄교자속을 나타낸다.

### 2.2 고정투자율법을 적용한 해석 방법

고정투자율법이란 (Fixed Permeability Method) 시스템이 자기적으로 포화 상태에 있을 때 각 요소별 동작 지점의 투자율을 고정하여 선형적으로 시스템을 재해석하는 방법으로, 두 가지 이상의 자계원에 의해 포화가 발생할 경우, 각각의 영향을 구분 지어 포화시 철심내의 자계 비선형 문제를 해석할 수 있다 [3].

고정투자율법을 적용한 인덕턴스 계산 수식은 다음과 같다.

$$L_{ds}^*(i_{ds}^r, i_{qs}^r) = \frac{\lambda_d^*(i_{ds}^r, i_{qs}^r)}{i_{ds}^r} \quad (4)$$

$$L_{qs}^*(i_{ds}^r, i_{qs}^r) = \frac{\lambda_q^*(i_{ds}^r, i_{qs}^r)}{i_{qs}^r} \quad (5)$$

먼저 영구 자석과 전기자 전류를 동시에 여자 시켜 비선형 수치 해석을 통해 각 요소별 상대 투자율값을 구한 후 이를 고정시킨 상태에서 (동일 요소당 사용) 전기자 전류만에 의한 개별 여자를 통하여 한번 더 선형 해석을 하여 각 축 쇄교자속  $\lambda_d^*$ ,  $\lambda_q^*$ 를 구하여 각 축 인덕턴스 값을 구한다.

그림 2와 3에서 위의 두가지 해석 방법을 통해 도출된 각 전류 조합별 인덕턴스 값들을 나타내었다. q축 인덕턴스값들은 거의 일치하지만 d축 인덕턴스의 경우 영

구 자석에 의한 쇄교 자속의 영향으로 두 해석값들간의 차이를 보여주고 있다.

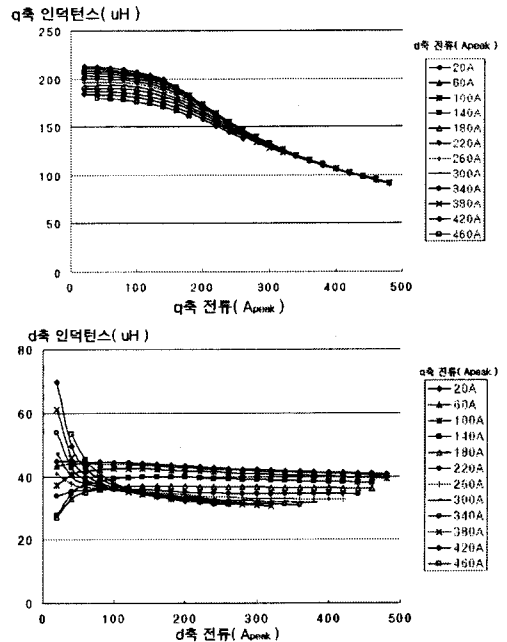


그림2. 기존의 수치 해석 방법으로 계산된 d축, q축 인덕턴스 (상호 포화 효과 고려)

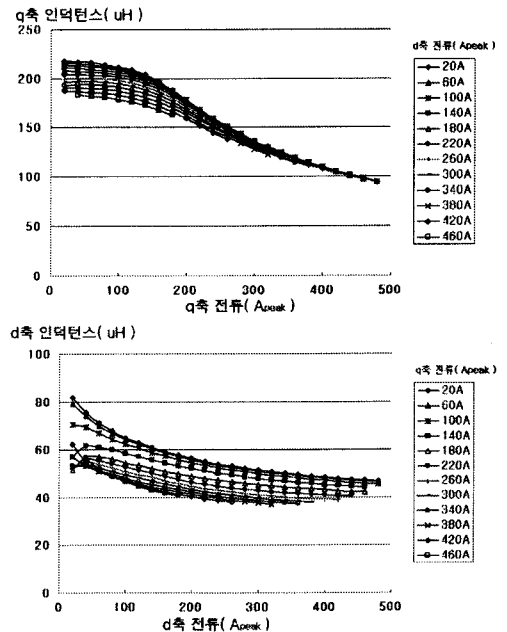


그림3. 고정 투자율법으로 계산된 d축, q축 인덕턴스

### 2.3 실험 결과

본 논문에서는 전동기의 속도와 동기 좌표계 d축과 q축 전류를 일정하게 유지하면서 전동기 d축, q축 전압을 측정하는 방법을 적용하여 인덕턴스 값을 측정하였다. 매입형 영구자석 전동기의 전압 방정식은 다음과 같다.

$$V_{ds}^r = R_s i_{ds}^r + L_{ds} \frac{d}{dt} i_{ds}^r - \omega_r L_{qs} i_{qs}^r \quad (6)$$

$$V_{qs}^r = R_s i_{qs}^r + L_{qs} \frac{d}{dt} i_{qs}^r + \omega_r L_{ds} i_{ds}^r + \omega_r \Phi_f \quad (7)$$

여기서,  $V_{ds}^r, V_{qs}^r$  : d축, q축 단자 전압

$R_s$  : 고정자 상저항,  $\omega_r$  : 동기 각속도

$\Phi_f$  : 영구 자석에 의한 쇄교 자속

실험 조건에 의해 위의 전압 방정식에서 미분항은 무시할 수 있으므로 d축과 q축 인덕턴스는 다음과 같이 계산된다.

$$L_{ds} = \frac{V_{qs}^r - R_s i_{qs}^r - \omega_r \Phi_f}{\omega_r i_{ds}^r} \quad (8)$$

$$L_{qs} = \frac{V_{ds}^r - R_s i_{ds}^r}{-\omega_r i_{qs}^r} \quad (9)$$

그림 4에서는 위의 방법으로 측정된 인덕턴스 값들을 나타내었다. 그림 2, 그림 3과 비교해 볼 때 고정투자율법에 의해 계산된 인덕턴스 값이 좀 더 실험값에 근접함을 알 수 있다. 하지만 d축 인덕턴스에서 여전히 오차가 발생하고 있으며, 이는 측정방향 길이가 작은 본 해석 모델의 엔드 권선에서 발생하는 누설 자속(end leakage flux)의 영향으로 예상된다.

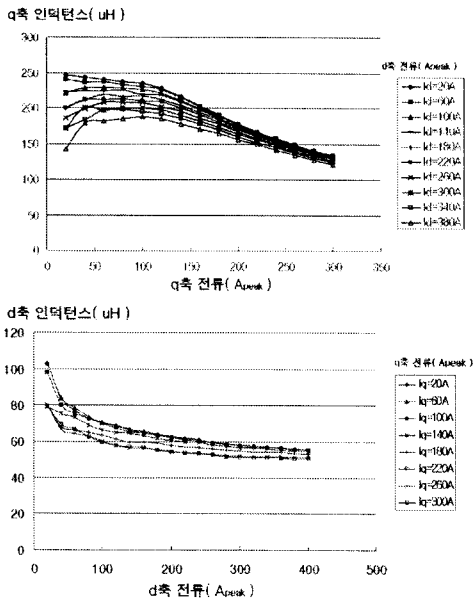


그림4. 실험으로 측정된 d축, q축 인덕턴스

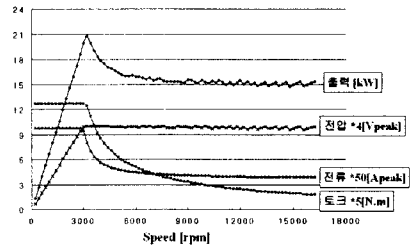
#### 4. 능력 곡선 (Capability Curve)

전동기 출력은 인버터의 전류 정격과 전동기의 열정격에 의해 결정되는 최대 전류와 인버터가 공급할 수 있는 최대 출력 전압에 의해 제한되며 그 제한 조건과 출력식은 다음과 같다. 여기서, 고속 운전 영역에서의 출력 특성을 알아보기 위해 전압 방정식의 미분항과 저항에 의한 전압 강하 성분을 무시하였다.

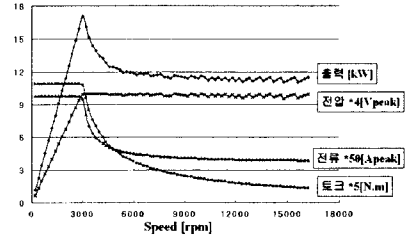
$$V_{ds}^r + V_{qs}^r \leq V_s^2 \max \quad (10)$$

$$I_{ds}^r + I_{qs}^r \leq I_s^2 \max \quad (11)$$

$$P = 3/2 (V_{ds}^r I_{ds}^r + V_{qs}^r I_{qs}^r) \quad (12)$$



(a) 기존의 해석 방법



(b) 고정투자율법 적용된 해석 방법  
그림5. 해석 모델의 능력 곡선

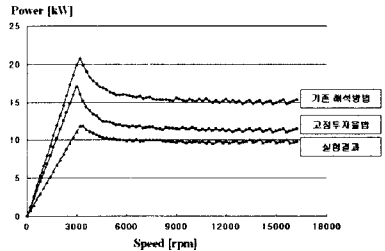


그림6. 해석결과와 실험값과의 비교 (출력)

그림 5에서 앞의 제한 조건을 통해 수치 해석적으로 계산된 해석 모델의 능력 곡선을 나타내었다. 고정투자율법을 통해 계산된 각 속도 영역별 출력과 토크값이 기존 해석방법을 통해 계산된 값보다도 작게 나오고 있으며, 이는 그림 6에서 나타내었듯이 실험값에 더 근접함을 알 수 있다. 따라서 고정투자율법을 적용한 수치해석 방법을 통해 기기 설계 단계에서 정확한 성능 예측이 가능하다 하겠다.

#### 5. 결 론

본 논문에서는 영구자석 기기에서 발생하는 d-q축간의 cross saturation 문제를 고려하여 d축과 q축의 전류에 따른 전동기의 특성값을 수치 해석적으로 계산하였고, 이를 이용하여 다양한 속도 영역에서 해석 모델의 능력 곡선(Capability Curve)을 도출하였다. 또한 고정투자율법을 적용하여 계산된 해석 결과와 실험값과의 비교를 통해 그 타당성을 검증하였다.

#### [참 고 문 헌]

[1] 배본호, "큰 돌극성을 가진 영구 자석 교류 전동기의 제어에 대한 연구," 박사학위논문, 서울대학교 전기공학부, 2002  
 [2] 박상엽, 김재광, 정현교, "IPM의 자계 Cross-Coupling 특성에 관한 연구," 대한전기학회 하계학술대회 논문집, pp.991-993, 2003년 7월.  
 [3] 서장호, 정상용, 정현교, "고정 투자율법을 적용한 자계 포화특성 해석에 관한 연구," 대한전기학회 하계학술대회 논문집, pp.997-999, 2003년 7월.