

# HEV용 매입형 영구자석 동기전동기의 회전자 극수에 따른 운전영역 및 특성 파라미터 분석

## Study on the Operation Region and Characteristic parameters in Magnetic Pole of IPMSM for HEV

장익상\*  
Iksang Jang

김원호\*  
WonHo Kim

진창성\*  
Changsung Jin

이주†  
Ju Lee

### ABSTRACT

Interior Permanent Magnet Synchronous Motor(IPMSM) produces two kind of torque that Magnetic and Reluctance torque. The permanent magnet linkage flux  $\Psi_a$  and d-axis and q-axis inductance have an important influence on the torque characteristic of IPMSM. Thus their accurate prediction is essential for predicting performance aspect such as the torque and flux-weakening capabilities. In this paper, we compared the characteristic parameters and operation region of two type IPMSM which has different pole numbers.

### 1. 서론

IPMSM은 구조적으로 마그네틱 토크와 릴럭턴스 토크가 합성된 토크를 발생하기 때문에, 영구자석에 의한 높은 토크를 낼 수 있으며, 적절한 돌극성을 갖도록 회전자자를 설계하면 자석 발생토크를 대신할 수 있어, 약자속 제어법을 이용하면 SPMSM에 비하여 고속에서도 운전을 할 수 있다[1]. 또한 IPMSM은 SPMSM에 비하여 높은 토크밀도와 파워밀도를 가지고 효율이 높은 많은 장점이 있기 때문에, 그 응용분야가 점점 증가하고 다양해지고 있다. 그 대표적인 응용분야로, Hybrid Electric Vehicle를 들 수 있으며, HEV가 요구하는 저속 고토크, 넓은 운전영역, 그리고 고효율을 IPMSM은 모두 만족시킨다. 하지만 IPMSM은 BLDC나 SPMSM에 비하여 상대적으로 구조 및 제어 시스템이 복잡하고 전동기 설계, 파라미터 및 특성 해석법, 가변속 제어 알고리즘 및 구동회로 측면에서의 종합적 연계 연구가 진행중에 있다.

IPMSM은 기본적으로 영구자석의 전기자 쇄교자속  $\Psi_a$ 와 d, q축 인덕턴스인  $L_d, L_q$ 로 표현된다. 여기서  $\Psi_a$  마그네틱 토크에 기여하고,  $L_d, L_q$ 는 돌극차  $L_q - L_d$ 에 의한 릴럭턴스 토크에 영향을 미치는 파라미터이다. 따라서 이 3가지 파라미터를 알게 되면 그에 따른 IPMSM 특성을 알 수 있다. 본 논문에서는 IPMSM에의 극수에 따른 운전영역의 변화를 살펴보기 위하여, 다른 조건은 동일하게 한 상태에서 전동기의 극수에 변화를 주어, IPMSM의 특성 파라미터의 변화를 연구하였고, 이것으로부터 릴럭턴스 토크를 계산하여, 각 모델의 운전영역을 연구하였다.

### 2. 해석모델

IPMSM의 회전자 구조는 그림 1.에서와 같이 크게 영구자석과 베리어 그리고 회전자 코어로 구분할 수 있다. 영구자석의 양은 마그네틱 토크에 영향을 주며, 베리어의 역할은 영구자석에서 나오는 자속의 누설을 막아서 코일과의 쇄교자속량을 늘려주는 역할을 한다. 또한 베리어의 형상은 q축 자로와 관련이

† 책임저자 : 이주, 한양대학교, 전기공학과, 정교수  
E-mail : julee@hanyang.ac.kr  
TEL : (02)2220-0349 FAX : (02)2295-7111

\* 장익상, 한양대학교, 전기공학과, 박사과정  
\* 김원호, 한양대학교, 전기공학과, 박사과정  
\* 진창성, 한양대학교, 전기공학과, 박사과정

있기 때문에, q축 인덕턴스에 영향을 준다. 영구자석과 배리어 형상에 따른 영향을 최소화하기 위하여, 본 해석모델에서는 영구자석의 양을 동일하게 사용하였으며, 극호비를 동일하게 하였으며, 극수를 제외한 모든 조건을 동일하게 선정하여 해석을 수행하였다. 해석모델의 사양은 표 1.에 나타내었다.

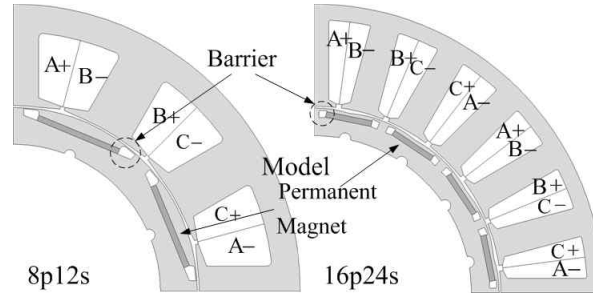


그림 1. 해석모델

표 1. 해석모델 사양

항목	단위	모델 1	모델 2
극수/슬롯수		8 / 12	16 / 24
상 저항	$\Omega$	7.7	
정격 전류	A	3.5	
최대 전압	V <sub>peak</sub>	190	
기저 속도	rpm	400	

### 3. 파라미터 계산

#### 3.1. 영구자석의 전기자 쇄교자속 $\psi_a$

영구자석의 전기자 쇄교자속  $\psi_a$ 는 무통전 상태에서 일정한 속도로 전동기를 회전시켰을 때의 전기자 쇄교자속을 계산함으로써 구할 수 있다. 각 모델의  $\psi_a$ 를 그림 3에 나타내었고, 각각의 배리어에 따른 누설자속을 FEM 해석을 통하여 그림 2에 비교하였다. 그림 2에서 보여지는바와 같이 상대적으로 극수가 많은 16극 24슬롯의 경우가 누설자속량이 많아져서 영구자석의 전기자 쇄교자속량이 줄어드는 것을 확인할 수 있다.

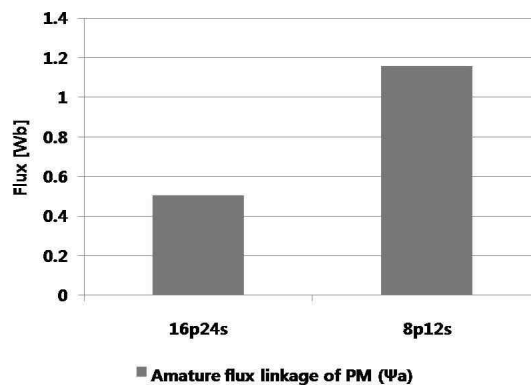


그림 2. 영구자석의 전기자 쇄교자속

#### 3.2. d, q축 인덕턴스 $L_d, L_q$

$L_d, L_q$ 는 그림 3에 나타낸 정상시의 자속벡터도와 그림 4에서의 유기전압 파형으로부터 위상차  $\alpha$ 를 구하고 이를 이용하여 다음과 같은 순서로 구할 수 있다[2][3].

① 모터단자를 개방하고, 부하측으로부터 모터를 구동한 상태를 가정하여 유한요소법으로 회전자를 회전시켜, U상 권선에 쇄교하는 자속 또는 U상의 유기전압의 변화를 계산한다.

② 모터에 전류를 흘린 상태를 가정하고, 인덕턴스를 계산하고 싶은 전류값  $I_a$ 를, 임의의 전류위상  $\beta$ 로 입력한다. ①과 같은 방법으로 회전자를 회전시키고 U상 권선에 쇄교하는 자속 또는 U상의 유기전압 변화를 계산한다.

③ ①,②로부터 얻어진 파형의 기본파성분의 실효값  $\psi_{ua}, \psi_{uo}$  및 위상차  $\alpha$ 를 계산한다.

④ ③에서 얻어진 값으로부터 식 (1)~(6)을 이용하여 산출한다.

$$i_d = -I_a \sin\beta \tag{1}$$

$$i_q = I_a \cos\beta \tag{2}$$

$$\Psi_a = \sqrt{3} \Psi_{ua} \tag{3}$$

$$\Psi_o = \sqrt{3} \Psi_{uo} \tag{4}$$

$$L_d = \frac{\Psi_o \cos\alpha - \Psi_a}{i_d}$$

(5)

$$L_q = \frac{\Psi_o \sin\alpha}{i_q} \tag{6}$$

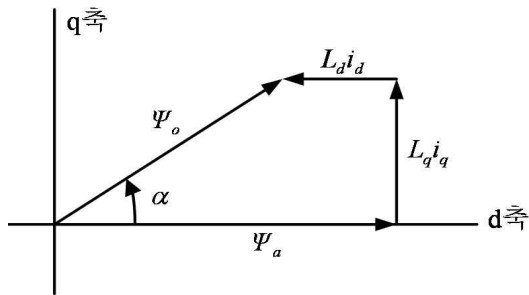


그림 3. IPMSM의 벡터도

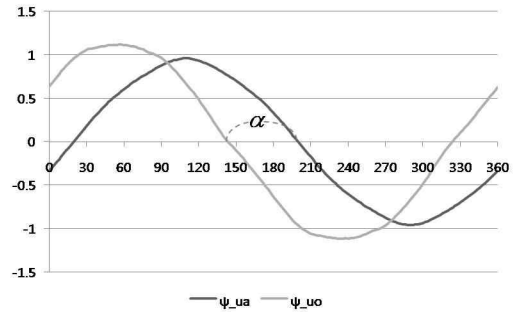


그림 4. U상 유기전압 파형

## 4. 결과분석

### 4.1. 인덕턴스

IPMSM의 최대토크는 전류위상각  $\beta = 0^\circ \sim 45^\circ$ 에서 나타나며, 정출력 영역에서는 속도에 따라 전압 제한에 걸리는 전류위상각  $\beta$ 가 변한다. 전류위상각  $\beta$ 가 변하면서 고정자 전기 강판의 포화 현상이 달라지므로 d, q축 인덕턴스 또한 변하게 된다. 그러므로 특성 해석시에는 전류위상각  $\beta$ 에 따른  $L_d, L_q$  값을 이용해야 하며, 그림 5에 계산된  $L_d, L_q$  값을 나타내었다.

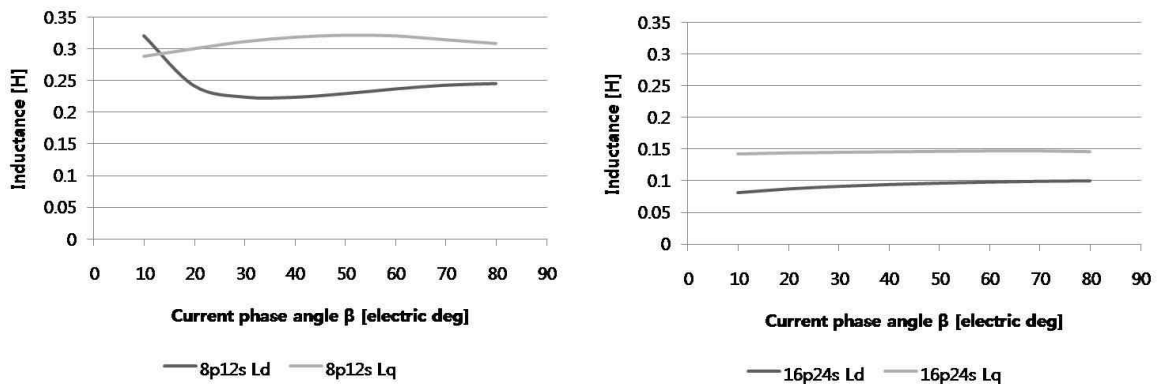


그림 5. 전류 위상각  $\beta$ 에 따른  $L_d, L_q$

### 4.2. 토크특성

IPMSM의 토크식은 다음과 같다.

$$T = P_n \Psi_a i_q + P_n (L_d - L_q) i_d i_q \quad (7)$$

식 (7)에서 알 수 있듯이 토크는 IPMSM의 회전속도와는 무관하며, 입력 전류와 영구자석의 전기자 쇠교자속  $\Psi_a$  그리고  $L_d$ ,  $L_q$ 와 관련이 있다.

3절에서 계산한 3가지 파라미터  $\Psi_a$ 와 전류위상각  $\beta$ 에 따른  $L_d$ ,  $L_q$ 를 위 식에 대입하여 두 모델의 전류 위상각에 따른 토크를 계산하여 그림 6에 나타내었고, 이때의 토크성분을 마그네틱 토크와 릴럭턴스 토크로 구분하여 그림 7에 나타내었다.

극수에 따른 토크특성을 살펴보면 16극 24슬롯인 모델이 8극 12슬롯 모델에 비하여 쇠교자속량이 적기 때문에 마그네틱 토크의 크기가 상대적으로 크다.

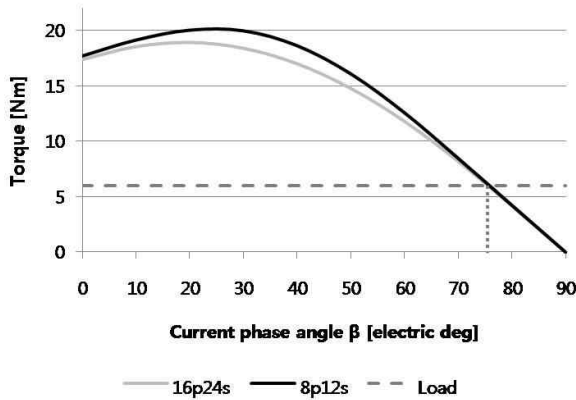


그림 6. 전류 위상각  $\beta$ 에 따른 토크특성

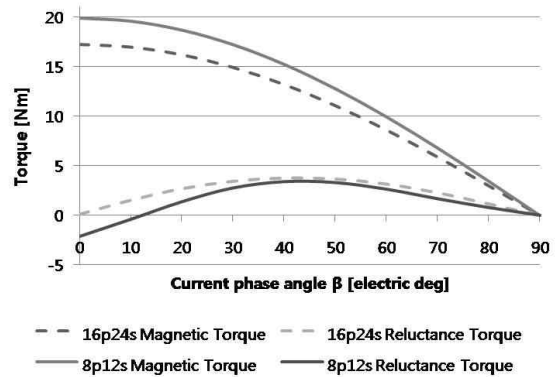


그림 7. 마그네틱 토크와 릴럭턴스 토크

#### 4.2.1 고속 운전영역 (1300rpm)에서의 토크특성

IPMSM이 고속운전영역인 1300rpm에서 운전한다고 하였을 때, 전압제한값에 의하여 결정되는 합성 자속의 최대값  $\Psi_{o\max}$ 는 식 (8)과 같이 결정된다.

$$\Psi_{o\max} = \frac{V_{a\max}}{2\pi f} \quad (8)$$

식 (8)에 의해 계산된 쇠교자속 제한값( $\Psi_{o\max}$ )을 만족하기 위해서는 음의 d축 전류를 키워서 영구자석의 자속의 크기를 줄여주어야 한다. FEM해석을 통하여 전류위상각  $\beta$ 에 따른 합성 쇠교자속( $\Psi_o$ )을 계산하였고, 각 모델에 대한  $\Psi_{o\max}$ 와  $\Psi_o$ 를 그림 8에 나타내어  $\Psi_o$ 가  $\Psi_{o\max}$ 보다 작아지기 시작하는 점을 전압제한에 걸리기 시작하는  $\beta$ 값으로 선정하였다.

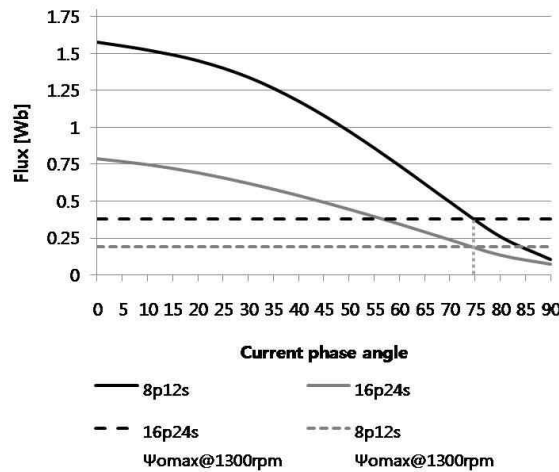


그림 8. 전류 위상각  $\beta$ 에 따른 쇄교자속  $\psi_o$ .

두 모델 모두  $\beta = 75^\circ$  에서 전압제한에 걸리는 것을 확인할 수 있으며, 지점에서의 계산된 파라미터를 취하여 이것으로부터 토크를 계산하여 표 3에 비교하였다. 그림 9에서 각 모델의 파라미터를 그래프로 비교하였다.

고속영역인 정출력 영역에서는 릴럭턴스 토크의 비중이 상대적으로 증가하게 되며 16극 24슬롯 모델의 릴럭턴스 토크의 크기가 8극 12슬롯 모델에 비하여 크기 때문에 1300rpm 에서의 총 토크는 두 모델 모두 비슷한 것을 확인할 수 있다. 이때의 모터 파라미터 및 토크를 그림 9에 비교하였다.

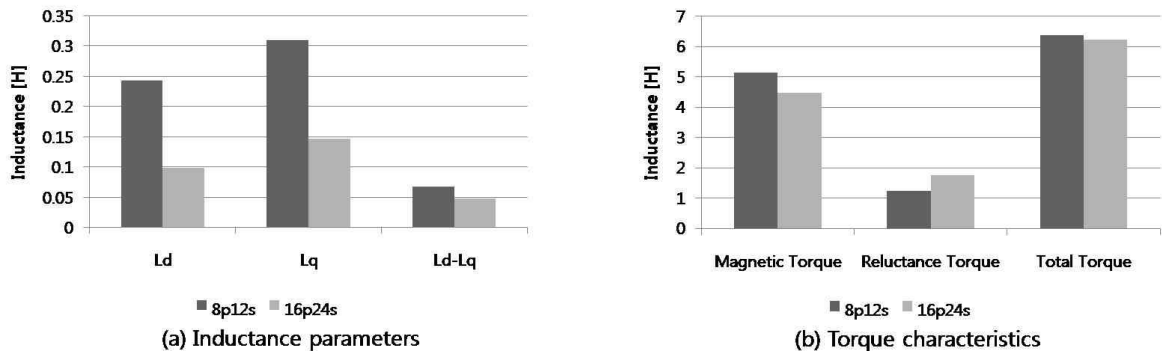


그림 9. 고속 운전영역(1300 rpm)에서의 전동기 파라미터와 토크특성

고속영역인 1300rpm은 기저속도인 400rpm을 상회하는 속도이므로, 정출력 영역에서 운전을 하게 되고, 약자속 제어를 해야하기 때문에 전류 위상각  $\beta$ 가 커지게 되며 이에 따라서 q축 전류가 감소하고 음의 d축 전류가 증가하게 되어 상대적으로 릴럭턴스 토크의 비중이 증가하게 된다.

극호비를 동일하게 유지한 채로 극수를 늘리게 되면, q축 자료가 포화되는 정도가 상대적으로 작아지기 때문에, 돌극비가 커지게 되며, 따라서 릴럭턴스 토크의 비율이 커지는 것을 확인할 수 있다.

#### 4.3. 시뮬레이션 과 실험 값의 비교

FEM 해석에 의한 토크의 유효성을 검증하기 위하여, 8극 12슬롯 모델을 직접 제작하여, 토크를 측정하였다. 그림 10은 실제 제작모델과 실험 장비의 사진이며, 그림 11에 FEM 해석으로 계산한 토크 값과 실험에 의해 측정된 토크 값을 비교하였다.

제작된 모터의 최대토크는 19.5 Nm로 으로 해석모델과 비슷한 값을 갖고, 최대 토크를 내는 지점이  $\beta = 20^\circ$  로 동일함을 알 수 있다. 따라서 시뮬레이션에 의하여 구한 파라미터를 이용하여 토크를 비교하고 그 값이 비슷함으로 보아 계산된 파라미터의 값이 유효하다는 것을 확인할 수 있다.

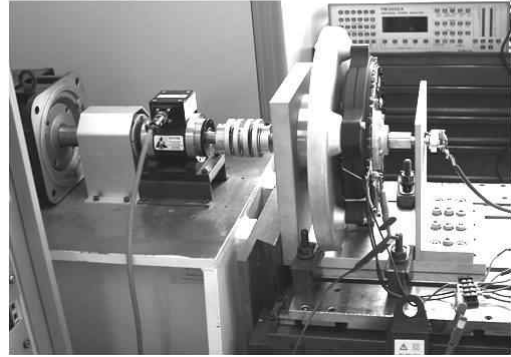
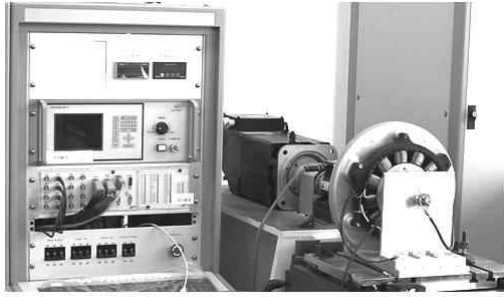


그림 10. 제작 모델과 실험 장비

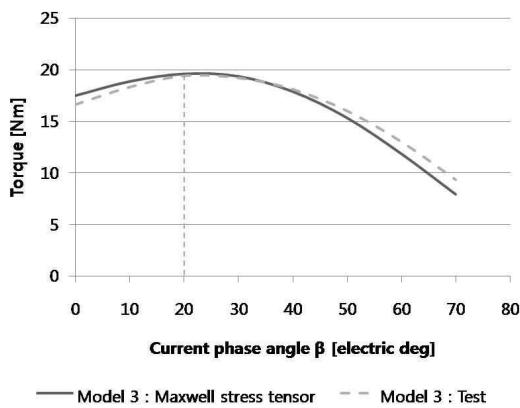


그림 11. 시뮬레이션과 실험에 의한 토크 측정

## 5. 결론

본 논문에서는 FEM 해석을 통하여 영구자석의 전기자 쇄교자속  $\Psi_a$ 와 d, q축 인덕턴스  $L_d, L_q$ 를 계산하였다. 이것으로부터 마그네틱토크와 릴럭턴스토크를 각각 계산하였다. 계산된  $L_d, L_q$ 의 유효성은 맥스웰 스트레스 텐서법에 의한 평균 토크와 계산된 토크를 비교함으로써 검증하였으며, 모델 2에 대하여 전동기를 제작하여 토크를 비교하였다.

극수가 늘어나면 영구자석의 누설자속량이 많아져서  $\Psi_a$  값은 줄어들게 되지만 16극에 비하여 q축 자로의 포화가 줄어들어 돌극비가 커지게 되고, 8극 모델의 경우 누설이 줄어들어  $\Psi_a$ 는 커지게 되지만 q축 자로의 포화가 커져 돌극비가 작아지는 것을 확인하였다. 고속영역에서의 릴럭턴스 토크를 보다 많이 이용하기 위하여서는, 돌극비를 높게 가져가는 설계가 중요하며, 제어를 고려하지 않는다면 q축 자로의 포화가 적어지는 다극 모델이 유리하다.

### 감사의 글

본 논문은 지식경제부의 지원으로 수행한 고효율 기어드 모터 및 제어기 Series화 개발 사업(과제번호 : 10032866)의 연구결과입니다.

### 참고문헌

1. A. Kiousmarsi, M. Moallem, and B. Fahimi, "Mitigation of torque ripple in interior PM motors by optimal shape design," IEEE Trans. Magn, vol. 42, No. 11, pp. 3706-3711, Nov. 2006
2. 한양대학교 에너지변환연구실 譯, "매입자석 동기모터의 설계 및 제어", 인터비전, 2007

3. Rukmi Dutta and M. F. Rahman, “A Comparative Analysis of Two Test Methods of Measuring d- and q-Axes Inductances of interior permanent-Magnet Machine” , IEEE TRANSACTIONS ON MAGNETICS, VOL. 42, NO 11, p. 3712~3718, 2006