

배리어 길이에 따른 매입형 영구자석 동기전동기의 Ld, Lq 특성 파라미터에 관한 연구

장익상*, 진창성*, 정대성*, 김승주*, 박재영*, 이주*
한양대학교*

Study on the Ld, Lq Characteristic Parameter of Interior Permanent Magnet Synchronous Motor in different barrier width

Iksang Jang*, Chang-Sung Jin*, Dae-Sung Jung*, Seung-Joo Kim*, Jae-Young Park*, Ju Lee*
Hanyang University*

Abstract - In this paper, we calculated permanent magnetic linkage flux Ψ_a and Ld, Lq parameters of IPMSM and compared two model which has different barrier width.

IPMSM has two kinds of torque that reluctance torque and magnetic torque. In constant torque region, using the Maxwell stress tensor method, we calculated the torque and current phase angle β which has appeared maximum torque. In weakening flux region, we calculated the current phase angle β which flux Ψ_o lower than limited flux $\Psi_{o,max}$. From the current phase angle β , we calculated torque by torque equation and compared two model characteristic.

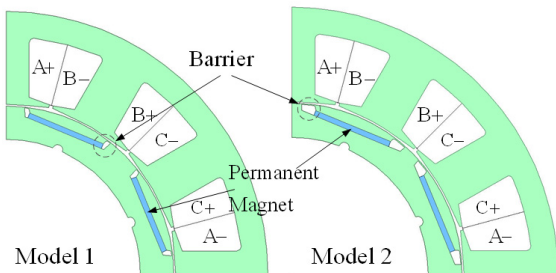
1. 서 론

IPMSM은 구조적으로 마그네틱 토크와 릴럭턴스 토크가 합성된 토크를 발생하기 때문에, 자석에 의한 높은 토크를 낼 수 있으며, 적절한 돌극성을 갖도록 회전자를 설계하면 자석 발생토크를 대신할 수 있어, 약자속 제어법을 이용하면 다른 전동기에 비해 고속에서도 운전할 수 있다. IPMSM의 이러한 특성은 기본적으로 영구자석의 전기자 쇄교자속 Ψ_a 와 d, q축 인덕턴스인 Ld, Lq로 표현된다. 따라서 이 3가지 파라미터를 알게 되면 그에 따른 전동기의 특성을 알 수 있다.

본 논문에서는 배리어의 길이에 변화를 주어 Ψ_a 와 Ld, Lq를 계산하여 전동기의 특성을 살펴본다.

2. IPMSM 해석모델

IPMSM에서 배리어의 역할은 영구자석에서 나오는 자속의 누설을 막아서 코일과의 쇄교자속량을 늘려주는 역할을 한다. 또한 배리어의 길이가 달라지면 q축 자로 또한 변하게 되어 인덕턴스에 영향을 준다.



〈그림 1〉 IPMSM 배리어 형상

〈표 1〉 해석 IPMSM 사양

| 항목 | 단위 | 모델 1 | 모델 2 |
|-----------|------------|-----------------|------|
| 극수/슬롯수/상수 | | 8 / 12 / 3 | |
| 배리어 길이 | mm | 1.5 | 6.5 |
| 상 저항 | Ω | | 7.7 |
| 정격 전류 | A | | 3.5 |
| 최대 전압 | V_{peak} | | 190 |
| 기저 속도 | rpm | | 400 |
| 세탁 모드 | | 20 Nm @ 45rpm | |
| 탈수 모드 | | 3 Nm @ 1300 rpm | |

본 논문에서는 배리어의 길이에 의한 모터 특성을 알아보기 위해 세타기에 사용되는 IPMSM의 배리어 길이를 다르게 한 2가지 모델에 대하여 3가지 파라미터를 계산하였다. 해석에 사용한 모델과 제원을 그림 1과 표 1에 나타냈다.

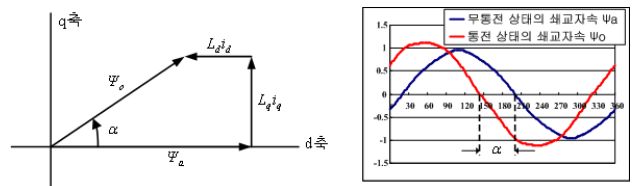
3. 파라미터 계산

3.1 d, q축 인덕턴스 Ld, Lq

본 논문에서는 그림 2에 나타난 정상시의 자속벡터도를 이용하여 다음 식을 이용하여 Ld, Lq를 계산하였다.

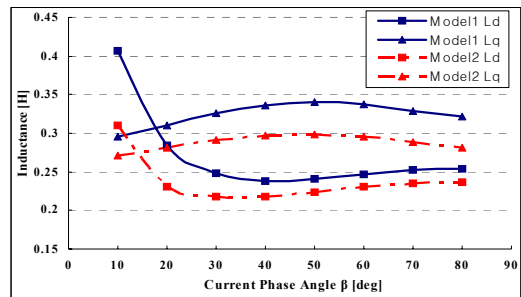
$$L_d = \frac{\Psi_o \cos \alpha - \Psi_a}{i_d} \tag{1}$$

$$L_q = \frac{\Psi_o \sin \alpha}{i_q} \tag{2}$$



(a) IPMSM의 벡터도 (b) U상 유기전압 파형
〈그림 2〉 IPMSM의 벡터도와 U상 유기전압 파형

IPMSM의 최대토크는 전류위상각 $\beta = 0^\circ \sim 45^\circ$ 에서 나타나며, 정출력 영역에서는 속도에 따라 전압제원에 걸리는 전류위상각 β 가 변한다. 전류위상각 β 가 변함에 따라서 고정자 전기장관의 포화 현상이 달라지므로 d, q축 인덕턴스 또한 변하게 된다. 따라서 특성 해석시에는 전류 위상각 β 에 따른 Ld, Lq값을 이용해야 하며, 그림 3에 계산된 Ld, Lq값을 나타내었다.



〈그림 3〉 전류 위상각 β 에 따른 Ld, Lq와 돌극차

3.2 영구자석의 전기자 쇄교자속 Ψ_a

영구자석의 전기자 쇄교자속 Ψ_a 는 무통전 상태에서 일정한 속도로 전동기를 회전시켰을 때의 전기자 쇄교자속을 계산함으로써 구할 수 있다. 모델 1과 2의 Ψ_a 를 표 2에 비교하였다.

Ψ_a 는 전동기의 회전속도와 무관하며 배리어의 길이에 따라 달라짐을 알 수 있는데, 배리어의 길이가 긴 모델 2의 릴럭턴스가 커지게 되어 모델 1에 비하여 누설자속이 줄어들어 큰 Ψ_a 값을 갖는다.

〈표 2〉 영구자석의 전기자 쇠교자속

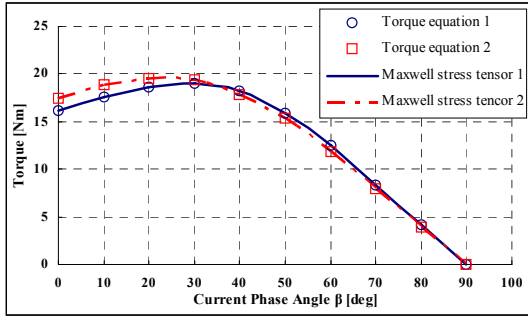
| | 모델 1 | 모델 2 |
|---------------|-------------|-------------|
| 쇠교자속 Ψ_a | 1.123335996 | 1.147218521 |

4. 토크 특성

IPMSM의 토크식은 다음과 같다.

$$T = P_n \Psi_a i_q + P_n (L_d - L_q) i_d i_q \quad (3)$$

앞에서 구한 3가지 파라미터 Ψ_a 와 L_d, L_q 를 위 식에 대입하여 두 모델의 전류 위상각에 따른 토크를 계산하였고, 구한 파라미터의 타당성을 검증하기 위하여 맥스웰 스트레스 텐서법으로 계산한 토크의 평균값과 비교하여 그림 4에 나타냈다.



〈그림 4〉 전류 위상각 β 에 따른 토크 특성

4.1 정토크 영역(45rpm)에서의 토크 특성

최대토크는 모델 1은 $\beta = 30^\circ$ 에서 모델 2는 $\beta = 20^\circ$ 에서 한다. 이로부터 45rpm에서의 최대토크를 비교하기 위하여, 두 모델의 최대토크 지점에서의 인덕턴스를 계산하고 이것으로부터 토크를 비교하였다.

〈표 3〉 45rpm에서의 인덕턴스와 토크

| 항목 | 단위 | 모델 1 ($\beta = 30^\circ$) | 모델 2 ($\beta = 20^\circ$) |
|----------|----|-----------------------------|-----------------------------|
| Ψ_a | Wb | 1.123335996 | 1.147218521 |
| L_d | H | 0.24699278 | 0.23147961 |
| L_q | H | 0.325107895 | 0.281698705 |
| 돌극차 | H | 0.078115 | 0.050219095 |
| 토크 | Nm | 19.16681405 | 19.67070944 |
| 마그네틱 토크 | Nm | 16.68068851 | 18.48441164 |
| 릴럭턴스 토크 | Nm | 2.486125543 | 1.186297802 |

표 3의 결과로부터 모델 1의 L_d, L_q 및 돌극비가 모델 2에 비하여 크다는 것을 알 수 있다. 이것은 모델 2의 배리어가 길기 때문에 상대적으로 q 축 자료가 작아지게 되어 L_q 의 감소량이 L_d 의 감소량보다 크게 나타나기 때문이다. 하지만 배리어가 길어지면서 영구자석의 누설자속이 줄어들게 되어 표 2에서 보는데와 같이 쇠교자속량 Ψ_a 가 증가하여 마그네틱 토크가 커져 목표토크인 20 Nm에 근접한 토크를 낸다.

4.2 정출력 영역(1300rpm)에서의 토크 특성

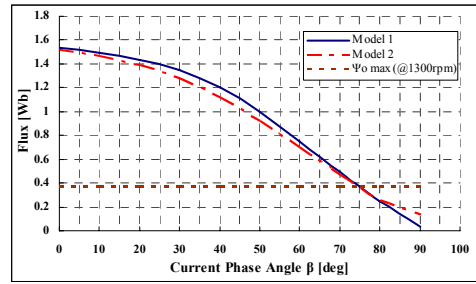
약자속 영역인 1300rpm에서의 전류위상각 β 는 전압제한값에 의하여 결정된다. 전압제한은 쇠교자속의 제한으로 표현이 되며 그 관계식은 다음과 같다.

$$\Psi_{o,max} = \frac{V_{a,max}}{2\pi f} \quad (4)$$

식 4에 의해 계산된 쇠교자속 제한값($\Psi_{o,max}$)과 FEM해석으로 계산한 전류위상각 β 에 따른 쇠교자속(Ψ_o)을 그림 5에 나타내었다.

두 모델 모두 $\beta = 75^\circ$ 에서 전압제한에 걸리는 것을 확인할 수 있으며 이때의 인덕턴스와 토크에 대하여 표 4에 비교하였다.

약자속영역인 1300rpm에서는 β 각의 증가로 d 축 전류가 커지게 되어 총 쇠교자속 Ψ_o 가 작아지게 된다. 따라서 두 모델간의 마그네틱 토크는 큰 차이를 갖지 않게 되고 릴럭턴스토크의 비중이 커지게 되어서, 돌극차가 큰 모델 1의 릴럭턴스 토크가 더 크게 되고, 전체 토크 또한 커진다.



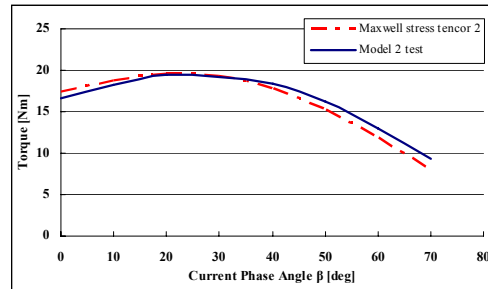
〈그림 5〉 전류 위상각 β 에 따른 쇠교자속 Ψ_o

〈표 4〉 1300rpm에서의 인덕턴스와 토크

| 항목 | 단위 | 모델1 ($\beta = 75^\circ$) | 모델 2 ($\beta = 75^\circ$) |
|----------|----|----------------------------|-----------------------------|
| Ψ_a | Wb | 1.123335996 | 1.147218521 |
| L_d | H | 0.252897434 | 0.236108624 |
| L_q | H | 0.32575573 | 0.28454171 |
| 돌극차 | H | 0.072858297 | 0.048433086 |
| 토크 | Nm | 6.32448011 | 5.981109754 |
| 마그네틱 토크 | Nm | 4.985708912 | 5.09115179 |
| 릴럭턴스 토크 | Nm | 1.338771198 | 0.88957963 |

4.3 실험 값과 비교

FEM 해석에 의한 토크값의 유효성을 검증하기 위하여, 최대토크가 큰 모델 2를 선정하여 제작하여, 토크를 측정하였다.



〈그림 6〉 해석 토크와 실험 토크의 비교

실험 모터의 최대토크는 19.5 Nm로 모델 2와 거의 같음을 알 수 있다. 위의 토크 비교로부터 계산된 파라미터의 유효성을 확인할 수 있다.

5. 결 론

FEM 해석을 통하여 영구자석의 전기자 쇠교자속 Ψ_a 와 d, q 축 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 검증하였다.

배리어가 길이에 따른 Ψ_a 와 돌극차는 트레이드오프 관계에 있기 때문에, 더욱 큰 토크가 필요한 곳에서는 모델 2가 적합하며, 보다 넓은 운전영역이 필요한 곳에서는 모델 1이 적합하다.

감사의 글

본 연구는 에너지 관리공단(Korea Energy Management Corporation)의 에너지 자원기술개발사업(The Energy Technology R&D)의 지원에 의해 수행 되었습니다.

〔참 고 문 헌〕

- [1] 한양대학교 에너지변환연구실 譯, “매입자석 동기모터의 설계 및 제어”, 인터뷰전, 2007
- [2] Jin Hur, “Characteristic Analysis of Interior Permanent Magnet Synchronous Motor in Electro-Hydraulic Power Steering systems”
- [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