

## 유한요소법을 이용한 영구자석 전동기의 파라메터 보정에 대한 연구

조 동혁\*, 심 동준\*, 정 현교\*, 정 태경\*\*

\* 서울대학교 공과대학 전기공학부

\*\* 중앙대학교 공과대학 전기공학과

### A study on the Parameter Correction of Permanent Magnet Motor using Finite Element Method

° Dong-Hyeok Cho\*, Dong-Joon Sim\*, Hyun-Kyo Jung\*, and Tae-Kyung Chung\*\*

\* School of Electrical Engineering, Seoul National Univ.

\*\* Dept. of Electrical Engineering, Choongang Univ.

#### Abstract

Since interior permanent magnet synchronous motor (IPMSM) has a structure whose magnet is inserted in the rotor, d, q inductances are differ from each other and the motor produces hybrid torque combined alignment term and reluctance term. But, for their complex magnetic path, it is difficult to analyze this type motors by equivalent magnetic circuit method. So, in this paper, the variation of parameters of IPMSM according to the magnet thickness accurred by using the result from finite element method is presented for the sake of effective design process.

#### 1. 서론

영구자석전동기는 자석이 회전자에 부착된 위치에 따라 구조적으로 표면 부착형 영구자석 전동기와 매입형 영구자석 전동기의 두 가지로 대별된다. 이중에서 매입형 영구자석 전동기는 회전자에 영구자석이 삽입되어 있는 구조를 가지고 있으므로 직축과 횡축간에 인더턴스의 차이가 발생한다. 이 인더턴스의 차이로 인해 전동기의 약제자 제어가 가능하고 월력턴스토크가 자석토크에 더해지게 되므로 소형이며 고속 고출력인 전동기의 설계가 가능하다.[1] 그러나 자기 회로가 복잡하고 철의 포화특성을 고려해야 하므로 자기동가회로법으로는 정확한 해석 및 설계가 어렵다. 이러한 단점을 보완하기 위해 유한요소법을 설계 투입에 포함하여 사용하는 방법이 널리 이용된다. 하지만, 매입형 영구자석 전동기의 최적 설계의 경우 그 특성식이 복잡하여 결정론적인 방법으로는 전체최적점을 찾는 것이 불가능하므로 유전 알고리즘을 비롯한 비결정론적인 최적화 기법을 사용해야 하고, 이 경우 유한요소법으로 해석해야 할 모델의 수가 너무 많아져서 비용이 많이 들뿐만 아

니라 시간이 너무 오래 걸리므로 현실적으로 사용하기는 어렵다.[2,3]

따라서 본 논문에서는 설계변수의 변화에 따른 매입형 영구자석전동기의 주요 파라메터들의 변화를 테이블로 제시하여 매입형 영구자석 전동기의 최적 설계에 도움이 되도록 하고자 한다.

#### 2. 등가 자기회로법에 의한 특성해석

매입형 영구자석 동기전동기는 그림 1에 보인 바와 같이 회전자철심 내부에 영구자석이 매입되어 있어 자기회로적으로 복잡한 형상을 가지고 있다.

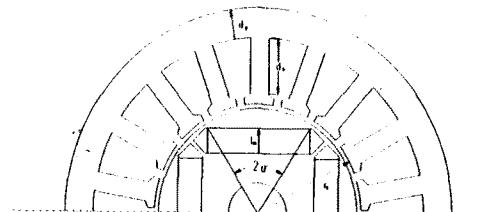


그림 1. 매입형 영구자석 전동기의 단면도

자기 등가 회로법에 의해 해석을 하기 위해서 다음과 같은 가정이 필요하다.[4,5]

첫째, 자석에 의한 공극자속밀도는 이상적으로 구형파를 가지고 있다고 가정한다.

둘째, 링크부는 일정한 자속밀도로 포화되어 있다.

세째, 자석에 의한 자속과 고정자 전류에 의한 자속은 중첩된다.

이러한 가정으로부터 구한 자석에 의한 공극자속밀도는식 (1)과 같다.

$$B_g = \frac{B_r w_m l_r - \phi_i}{\mu_r k_c g w_m l_r / l_m + 2 \alpha r_s l_r / p} \quad (1)$$

여기서,

|           |                        |
|-----------|------------------------|
| $B_r$     | : 자석의 잔류자속밀도           |
| $g$       | : 공극 길이                |
| $k_c$     | : 카터 계수                |
| $l_m$     | : 자석의 두께               |
| $l_r$     | : 고정자 축방향 길이           |
| $p$       | : 극짝수                  |
| $r_s$     | : 고정자 내경               |
| $w_m$     | : 자석의 폭                |
| $2\alpha$ | : 극호각                  |
| $\mu_r$   | : 자석의 비투자율             |
| $\phi_i$  | : 누설자속 = $B_s \cdot y$ |
| $B_s$     | : 철심의 포화자속밀도(1.8T)     |
| y         | : 링크부의 폭               |

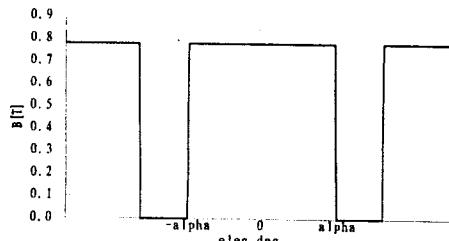


그림 2. 자석에 의한 이상적인 공극자속밀도

공극자속밀도 중 전동기의 특성계산에 이용되는 것은 공극자속밀도의 기본파성분이다. 그림 2.의 기본파 성분  $B_{g1}$ 은

$$B_{g1} = \frac{4}{\pi} \int_0^\alpha B_g \cos \theta d\theta = \frac{4 \sin \alpha}{\pi} B_s \quad (2)$$

각각의 인터턴스는 식 (3)과 식 (4)와 같이 나타낸다.

$$L_d = \frac{6 \mu_0 r_s l_r (k_w N_s)^2}{\pi p^2 g_d} + L_i \quad (3)$$

여기서,

$$g_d = \frac{k_c g}{k_{da} - \frac{k_1 k_a}{1 + \mu_r p k_c g w_m / 2 \alpha r_s l_m}}$$

$$k_{da} = (1/\pi)(2\alpha + \sin 2\alpha),$$

$$k_a = \frac{\sin \alpha}{\alpha}, \quad k_1 = \frac{4 \sin \alpha}{\pi}$$

$k_w$  : 권선 계수

$L_i$  : 누설 리액턴스

$N_s$  : 상당 권회수

$\mu_0$  : 공기의 투자율

$$L_q = \frac{6 \mu_0 r_s l_r (k_w N_s)^2}{\pi p^2 g_q} + L_i \quad (4)$$

여기서,

$$g_q = \frac{g_d}{k_{qa}}, \quad k_{qa} = \frac{2\alpha - \sin 2\alpha}{\pi}$$

### 3. 유한요소 해석에 의한 공극자속밀도와 인터턴스

2절에서는 자기동가회로법에 의한 매입형 영구자석 전동기의 주요 파라메터들을 구하였다. 그러나 자기동가회로법에 의한 해석은 설계 변수들의 영향을 정성적으로 파악할 수 있는 장점이 있는 반면 프린팅 효과와 회전자의 링크 부분의 포화로 인한 누설자속분과 자석 극호각의 증가로 인한 영향을 고려할 수 없는 단점이 있다.

따라서, 본 논문에서는 이러한 단점을 보완하기 위해 정자장 2차원 유한요소법을 사용하여 주요 파라메터를 구함으로써 정량적으로 보정하였다. 또한 철의 비선형 포화특성은 Newton-Raphson법을 사용하여 고려하였다.

본 논문에서 사용한 모델은 회전자의 반경을 10으로 하였을 때의 상대 치수로서 나타내었다. 공극은 0.15로 하였고 링크부와 웨브부분의 폭은 같다(0.5)고 가정하였으며 자석의 두께를 0.8에서 2.8까지로 변화시켜 가면서 공극자속밀도의 분포의 변화를 보았다. 본 연구에서 사용한 모델의 최종요소망 중 링크부와 웨브부를 확대하여 그림 3.에 나타내었다. 이때의 자석의 두께는 1.2이고 절점수는 4433개이고, 요소수는 8753개이다.

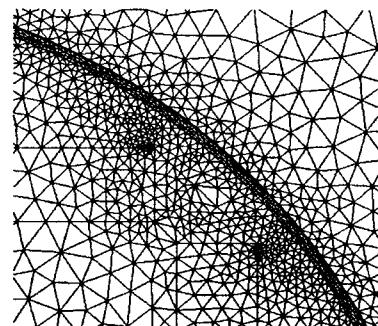


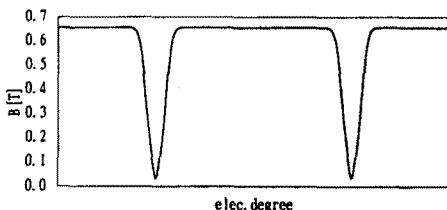
그림 3. 모델의 최종요소망(확대한 그림)

### 4. 결과

d, q축 전류가 없이 자석에 의한 공극자속밀도는 그림 4처럼 대형파에 가까운 결과를 얻었다. 그림 5.에서는 자석 두께에 따른 공극자속밀도의 분포를 보이고 있는데 자석의 폭이 가늘수록 자극이 확대되는 것을 볼 수 있다. 이 결과를 등가자기회로법에 이용하기 위하여 같은 면적과 고고를 가지는 등가 구형파로 대치하면 자극의 퍼짐 효

과를 계산할 수 있다. 이 결과를 그림 5에 그래프로서 나타내었다. 이 그래프에서 보이는 바와 같이 자석의 두께가 두꺼워지면 등가자기회로법에 의한 결과와 유한요소법에 의한 결과가 거의 일치되는 것을 알 수 있다.

자석 두께가 0.8일 때의 공극자속밀도



자석 두께가 2.8일 때의 공극자속밀도

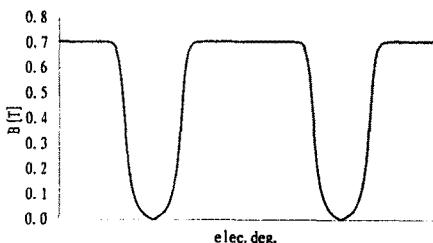


그림 4. 자석두께에 따른 공극자속밀도 분포의 변화

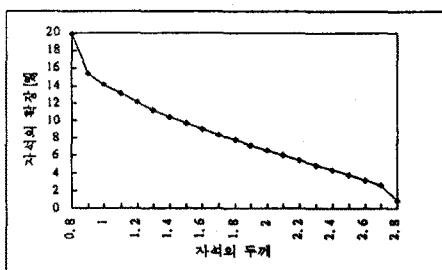


그림 5. 자석 두께에 따른 자석의 확장

그림 6에서는 자석의 두께가 0.8일 경우의 등가 d축 전류만에 의한 공극자속밀도를 보이고 있는데 철의 포화현상을 반영하기 위해서 자석과 d축 전류를 동시에 있다고 해석한 후 자석에 의한 부분을 뺀 것이다.

d, q축 인덕턴스의 보정 또한 공극자속밀도의 보정과 같은 방법으로 이루어진다. q축 전류와 자석에 의한 공극자속밀도의 분포는 그림 7과 같다.

## 5. 결론

본 논문에서는 매입형 영구자석 전동기의 공극자속밀도

와 인덕턴스를 등가자기회로법에 의해 유도하고 이를 유한요소법으로 보정하였다. 이 결과는 등가자기회로법에 기초한 매입형 영구자석 전동기의 설계에 바로 적용이 될 수 있으며, 또한 본 논문에서 제안된 방법은 여타의 다른 영구자석 전동기의 정확한 특성 해석에도 그대로 적용될 수 있을 것이다.

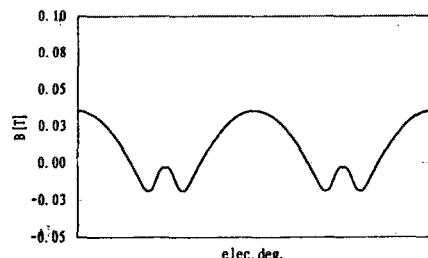


그림 6. 등가 d축 전류에 의한 공극자속밀도

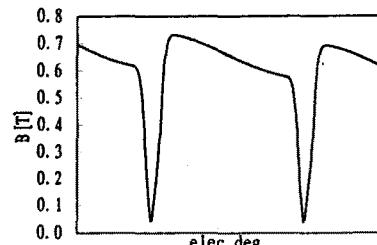


그림 7. 자석과 등가 q축 전류에 의한 공극자속밀도

본 논문은 자동제어목화연구센터의  
연구비 지원에 의한 결과입니다.

## 6. 참고문헌

- [1] P.Pillay, et al., "Performance & Design of Permanent Magnet AC Motor Drives", IEEE IAS tutorial course, 1991.
- [2] D.J.Sim, "Optimal Design of Interior Permanent Magnet Synchronous Motors Using Genetic Algorithm", Proc. of ICEE 95, pp 576-579.
- [3] N.Boules, "Design Optimization of Permanent Magnet DC Motors", Rec. of 1987 IEEE IAS Conf, pp.27-34.
- [4] T.J.E.Miller, "Brushless Permanent Magnet and Reluctance Motor Drives", Oxford, 1989.
- [5] H.S.Park, "Speed-Power Region Expansion of Interior Permanent Magnet Synchronous Motors by Optimal Dimension Design", Ph.D Thesis, Seoul National University, 1993.