

## Spoke type PMSM 회전자 자기등가회로 설계

조수영\*, 정태철\*, 이 주\*  
한양대학교\*

### Design of the magnetic equivalent circuit of Spoke type PMSM

Sooyoung Cho\*, Tae-chul Jeong\* and Ju Lee\*  
Hanyang University\*

**Abstract** - 전동기를 설계 시 자기등가회로법은 전동기의 세부 형상에 크게 구애를 받지 않기 때문에, 공간고조파법과 수치해석기법에 비해 유용하다. 이 논문에서는 Spoke type PMSM(Permanent Magnet Synchronous Motor)의 회전자 자기등가회로를 설계하였다. 회전자 자기등가회로를 통해, 마그네틱 토크 성분을 구성하는 공극자속밀도 수식을 이끌어 낼 수 있다. 이를 통해, Spoke type PMSM은 마그네틱 토크가 주 토크이기 때문에, 공극 자속밀도 및 형상지수비를 이용하여 전동기의 크기를 계산하였다.

#### 1. 서 론

전동기를 설계한다는 것은 원하는 속도에서 원하는 출력을 낼 수 있는 전동기를 가격, 부피, 진동 소음 등을 고려하여 설계하는 것이다. 따라서, 전동기를 기초 설계함에 있어서 전동기의 출력 토크 및 부피 산정이 중요하다. Spoke type PMSM의 경우 출력 토크식은 권선법에 따른 권선 계수, 전류와 턴수에 비례하는 비전기장하, 공극 직경, 적층길이, 극수, 기본파 공극 자속밀도 등의 값에 따라 결정된다. [1]

$$T = \frac{3}{2} p \lambda_{pm} I_a \cos \beta + \frac{3}{4} p (L_q - L_d) I_a^2 \sin 2\beta = T_m + T_r \quad [Nm] \quad (1)$$

$$= \left( \frac{\pi}{4} k_w \widehat{B}_g ac \cos \beta \right) D_g^2 L_{stk} + \left( \frac{\pi}{16} \frac{1}{p} k_w^2 ac^2 G_{a1} \sin 2\beta \right) D_g^3 L_{stk}$$

$$= C_{om} D_g^2 L_{stk} + C_{or} D_g^3 L_{stk}$$

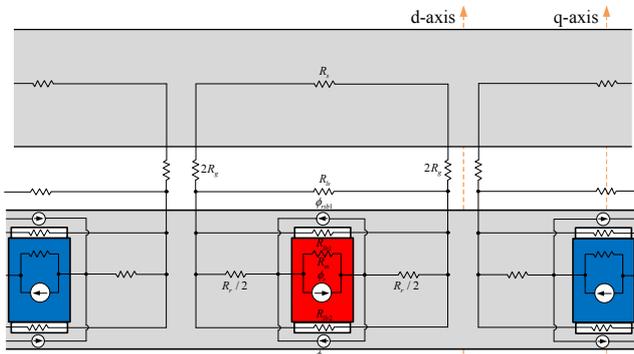
※  $T_m$  : 마그네틱 토크,  $T_r$  : 릴럭턴스 토크,  $ac$  : 비전기장하,  $k_w$  : 권선 계수,  $\beta$  : 전류 위상각,  $D_g$  : 공극 직경,  $L_{stk}$  : 적층 길이,  $p$  : 극 쌍수,  $G_{a1}$  : 기본파 비퍼미언스,  $C_{om}$  : 마그네틱 토크 출력계수,  $C_{or}$  : 릴럭턴스 토크 출력계수

Spoke type PMSM의 경우 자석에 의한 자속의 영향으로 마그네틱토크가 주토크를 구성하게 된다. 따라서, 회전자의 자기등가회로를 통해 기본파 공극자속밀도의 크기를 구하는 것이 중요하다.

#### 2. 본 론

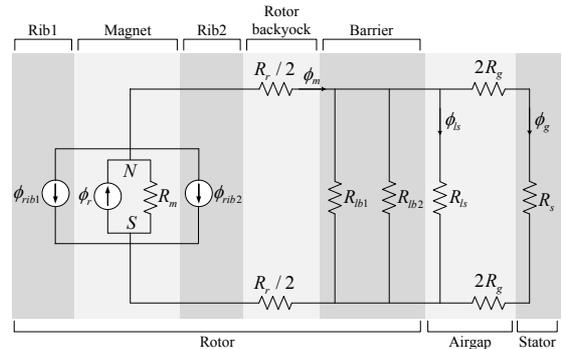
##### 2.1 Slot-less Spoke type PMSM 자기 등가회로 [1], [2]

Spoke type PMSM의 회전자에 의한 공극자속밀도를 구하기 위해 고정자 부분을 슬롯리스형태로 두고 자기등가회로를 구성한 그림은 다음과 같다.



〈그림 1〉 슬롯리스 고정자를 가진 Spoke type PMSM 자기등가회로

그림 1을 토대로하여 자기등가회로의 각부분을 표시하여 나타낸 그림은 그림 2와 같다.



〈그림 2〉 Spoke type PMSM 자기등가회로

Spoke type PMSM의 자기등가회로를 통해 공극적으로 얻을려고 하는 값은 공극자속밀도이고, 이는 공극자속을 공극면적으로 나눈 값이다. 따라서 먼저 위의 자기등가회로를 좀 더 간소화하여 공극자속 값을 구해야한다.

##### 2.1.1 Spoke type PMSM 자기등가회로 간소화

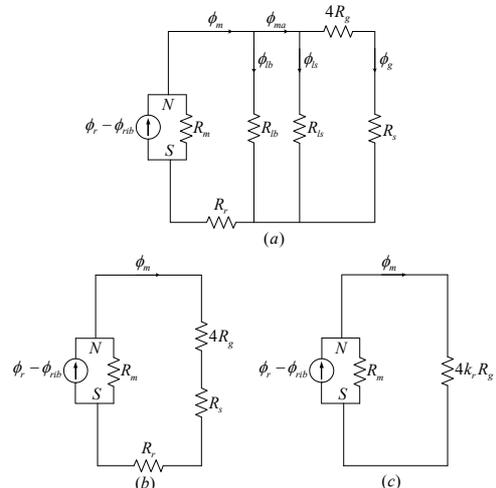
자기 등가회로 간소화에 앞서 그림 2에서 림에 의한 자속원 1, 2가 서로 같고, 베리어 누설 릴럭턴스 값이 서로 같다고 가정하였다.

$$\phi_{rib1} \approx \phi_{rib2}, \quad R_{ib1} \approx R_{ib2} \quad (2)$$

$$\phi_{rib} = \phi_{rib1} + \phi_{rib2} \approx 2\phi_{rib1} \quad (3)$$

$$R_{ib} = \frac{R_{ib1} R_{ib2}}{R_{ib1} + R_{ib2}} \approx \frac{R_{ib1}^2}{2R_{ib1}} = \frac{R_{ib1}}{2} \quad (4)$$

위 가정을 통해 그림 3.(a)와 같이 자기등가회로를 간략화 할 수 있고, 베리어 누설 릴럭턴스( $R_{ib}$ )와 공극 누설릴럭턴스 부분( $R_{is}$ )은 베리어 누설 계수( $k_{ib}$ )와 공극 누설계수( $k_{is}$ )를 이용하여 그림 3.(b)와 같이 나타낼 수 있다. 이 때,  $0.8 \leq k_{ib}, k_{is} < 1$



〈그림 3〉 Spoke type PMSM 자기등가회로의 간소화

베리어 누설계수와 공극 누설계수 및 공극 자속은 식 (5), (6)과 같다.

$$k_{ib} = \frac{\phi_{ma}}{\phi_m}, \quad k_{is} = \frac{\phi_g}{\phi_{ma}} \quad (5)$$

$$\phi_g = k_{is} k_{ib} \phi_m \quad (6)$$

누설 계수를 도입으로 인해 자기등가회로가 다소 간단해지고, 공극 릴럭턴스( $R_g$ )가 회전자와 고정자의 백요크 릴럭턴스( $R_r, R_s$ )보다 상당히 크기 때문에 릴럭턴스 계수( $k_r$ )를 도입하여 그림 3.(c)와 같이 최종적으로 간소화 된 회로를 얻을 수 있다. 이때,  $1 < k_r \leq 1.2$

$$4R_g + R_s + R_r = 4k_r R_g \quad (7)$$

그림 3.(c)에서  $\phi_m$ 을 구하면,

$$\phi_m = \frac{R_m}{R_m + 4k_r R_g} (\phi_r - \phi_{rib}) = \frac{1}{1 + 4k_r \frac{R_g}{R_m}} (\phi_r - \phi_{rib}) \quad (8)$$

### 2.1.2 공극 자속 밀도 계산

공극 자속 밀도를 구하기 위해 먼저 식 (6)과 식 (8)를 이용하여 공극 자속 식을 구하면,

$$\phi_g = k_{is} k_{ib} \phi_m = \frac{k_{is} k_{ib}}{1 + 4k_r \frac{R_g}{R_m}} (\phi_r - \phi_{rib}) \quad (9)$$

$$= \frac{k_{is} k_{ib}}{1 + 4k_r \frac{g' \mu_r A_m}{T_m A_g}} (\phi_r - \phi_{rib})$$

$$\ast R_m = \frac{T_m}{\mu_o \mu_r A_m}, \quad R_g = \frac{g'}{\mu_o A_g} \quad (\ast g' = k_{curt} g)$$

$$\phi_{rib1} = B_{sat} T_{rib1} L_{stk}, \quad \phi_{rib2} = B_{sat} T_{rib2} L_{stk}$$

$$\phi_{rib} \approx 2\phi_{rib1} = 2B_{sat} T_{rib1} L_{stk}$$

따라서 공극 자속 밀도는 식(9)의 공극 자속 식에 공극 면적을 나누어 구할 수 있다.

$$B_g = \frac{\phi_g}{A_g} = \frac{1}{\frac{A_g}{A_m}} \frac{k_{is} k_{ib}}{1 + 4k_r \frac{g' \mu_r A_m}{T_m A_g}} \left( B_r - \frac{2B_{sat} T_{rib1}}{W_m} \right) \quad (10)$$

하지만, 실제 마그네틱 토크에 이용되는 값은 공극 자속밀도의 기본과 값이므로, 식 (11)를 통해진 값을 마그네틱 수식에 넣어야 한다.

$$\widehat{B}_{g1} = \frac{4}{\pi} B_g \sin \frac{p\theta_m}{2} \quad (11)$$

따라서, 기초 설계 과정에서 공극자속밀도를 최종적으로 얻기 위해서는 자속원으로 모델링 된 립 자속원이 iteration과정을 통해 허용 오차 범위 안에 들 때까지 돌게 된다. 이러한 과정을 통해 공극자속 밀도의 기본과 크기가 변동하게 되고, 이에 따라 마그네틱 출력계수( $C_{om}$ )가 바뀌게 된다.

### 2.1.3 공극 직경과 적층길이 계산

앞의 iteration과정을 통해 얻어진 마그네틱 출력계수( $C_{om}$ )와 형상 치수비를 이용하여 공극 직경과 적층 길이를 계산할 수 있다.

$$K_{lt} = \frac{L_{stk}}{\tau_p} \quad : \text{형상치수비} \quad (12)$$

$$D_g^2 L_{stk} = \frac{T}{C_{om}} \quad (13)$$

$$D_g = \left( \frac{T}{C_{om}} \frac{2p}{\pi K_{lt}} \right)^{1/3}, \quad L_{stk} = K_{lt} \frac{\pi D_g}{2p} \quad (14)$$

또한, 추가적으로 자석의 폭의 값은

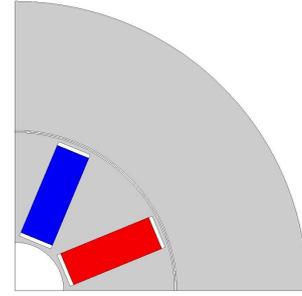
$$W_m = \left\{ (R_{ro} - T_{rib1} - T_{l1}) \times \cos \frac{\theta_m}{2} - (R_{shaft} - T_{rib2} - T_{l2}) \right\} \quad (15)$$

## 2.2 공극 자속 밀도 비교

앞의 자기등가회로를 이용하여 iteration과정을 통해 구한 기본과 공극 자속 밀도 값과 FEM 해석 결과 값을 비교하기 위해, 자기등가회로를 통해 얻은 파라미터는 표1에 나타나있고, 이를 이용하여 모델링한 그림은 그림 4와 같다.

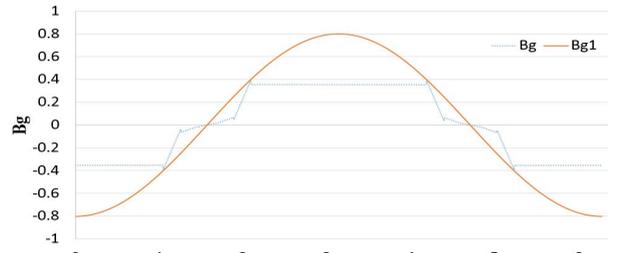
<표 1> 자기등가회로를 통해 얻은 설계 파라미터

Content	Value	Unit
고정자 외경	125.2	mm
공극 직경	63.8	mm
적층길이	28.6	mm
자석 폭	21.5	mm
자석 두께	7	mm



<그림 4> 자기등가회로 파라미터 결과 값을 이용한 Spoke type PMSM

그림 4를 FEM 해석을 통해 공극 자속 밀도 값을 얻어낸 그래프는 그림 5와 같다.



<그림 5> FEM 해석을 통한 공극자속밀도 및 기본과 공극자속밀도

FEM 해석을 통한 기본과 공극자속밀도와 자기등가회로를 통해 얻어 낸 기본과 공극자속밀도를 비교하면 표 2와 같고 이는 7.5 [%]의 오차를 가졌다.

<표 2> 기본과 공극 자속 밀도 값 비교

Content	FEM	자기등가회로	오차
기본과 공극 자속 밀도	0.80 [T]	0.74 [T]	7.5 [%]

## 3. 결 론

이 논문에서는 Spoke type PMSM의 회전자 자기등가회로를 구성하여, 실제 마그네틱 토크 값에 영향을 미치는 기본과 공극 자속밀도 값을 구하였다. Spoke type PMSM의 경우, 마그네틱 토크가 주 토크 분을 구성하기 때문에, 이를 이용하면 전동기의 기초 사이징 또한 할 수 있다. 자기등가회로의 정확도를 판별하기 위해 자기등가회로를 통해 얻은 파라미터를 이용하여 실제 모델링을 하여 FEM 해석한 결과, 자기등가회로를 통해 얻은 결과와 약간의 오차를 지님을 알 수 있었다. 이 후에는 고정자 부분까지 고려하여 실제 전동기의 기초 모델을 설계할 수 있도록 할 것이다.

## [참 고 문 헌]

- [1] 배재남, "비장차 자동 선정을 통한 영구자석 동기전동기의 설계기법에 관한 연구", 한양대학교 대학원 박사학위 논문, 2010
- [2] 임동국, 우동균, 여한걸, 노중석, 정현교, "자기등가회로를 이용한 폐입형 영구자석 전동기의 공극 자속 밀도 계산", 2013년도 대한전기학회 춘계학술대회 논문집, p.86-88, 2013