

# 자속 집중형 Spoke Type 영구자석 BLDC 전동기의 자기회로 및 특성 해석

論 文
53B-3-2

## Magnetic Circuit and Characteristics of A Flux Concentrated Spoke Type Permanent Magnet BLDC Motor

姜圭洪\* · 李秉國\*\* · 許眞\*\*\*  
(Gyu-Hong Kang · Byoung-Kuk Lee · Jin Hur)

**Abstract** - In this paper, the magnetic circuit characteristics and the current/torque analysis of a Spoke Type permanent magnet motor have been researched, compared with the SPM Type motor. In the magnetic circuit analysis, the characteristic of air-gap flux density has been analyzed according to the variation of the number of pole and the ratio of magnet height to arc length using finite element method and circuit equations. Moreover, the electromagnetic and the reluctance torque have been analyzed by the current profile, which is obtained from the variation of turn-on angle, and these informative data has been utilized for the overall characteristics of the Spoke Type BLDC motor.

**Key Words** : Electromagnetic and reluctance torque, Spoke Type BLDC motor,

### 1. 서 론

영구자석 전동기의 설계 방법으로는 영구자석을 기자력으로 치환하여 공극과 철심 각 부분의 퍼미언스로 등가자기회로를 구성하여 설계하는 방법, 유한요소법 (Finite Element Method : FEM)과 같은 수치해석적인 방법을 직접 설계에 적용하는 방법, 또는 등가자기회로법과 수치해석적인 방법을 결합하여 설계에 적용하는 방법들이 주를 이루고 있다 [1]-[3]. 이와 같은 설계 방법은 공극자속밀도의 정밀한 해석에 근간을 두기 때문에 설계 신뢰성 확보를 위한 공극자속밀도의 정확한 산정은 매우 중요하며 공극자속밀도에 큰 영향을 주는 설계요소로는 영구자석 형상과 회전자에서의 자기회로 구성방법 등이 있다.

영구자석을 이용한 브러시리스 전동기는 자기회로를 구성하는 영구자석과 회전자의 형태에 따라 표면 부착형 영구자석 전동기 (Surface Mounted Permanent Magnet Motor : SPM)와 매입형 영구자석 전동기로 분류된다. 또한, 매입형 영구자석 전동기는 자기회로 구성에 따라 IPM (Interior Permanent Magnet Motor) Type 전동기와 Spoke Type 전동기로 분류되어진다 [1]. 매입형 영구자석 전동기는 표면 부착형 영구자석 전동기와는 달리 영구자석이 회전자 내부에 삽입된 구조로써 회전자의 자극과 고정자 전류에 의한 자극이 상대적 위치에 따라 자기저항의 차가 발생하는 돌극 구조를 가진다. 즉 자기저항의 차로부터 발생하는 릴럭턴스

토크 (Reluctance Torque)가 영구자석에 의한 자속과 전기자 전류에 의한 전자기적 토크 (Electromagnetic Torque)에 중첩되어 발생하므로 표면부착형 영구자석 전동기에 비해 단위전류 당 큰 발생토크를 갖는 장점으로 인하여 이에 대한 연구 및 개발의 필요성이 증가하고 있다 [1]-[4].

특히, Spoke Type 영구자석 전동기는 영구자석이 회전자 자극의 양쪽에 분할, 세로로 배치되어 자극을 형성하는 구조를 가지고 있어 자속을 집중시킬 수 있는 장점을 지니고 있다. 즉, 영구자석이 회전자 한 극의 양 단부에 매입되어 대칭적으로 존재하며 자극은 영구자석 사이의 회전자 철심 표면으로 구성되는 구조를 가지고 있어 회전자의 기계적 제원이 일정한 경우에도 자극표면에 대한 영구자석의 단면적을 증가시켜 공극자속밀도를 증가시킬 수 있다. 따라서, 다른 영구자석 전동기에 비해 상대적으로 큰 발생토크 특성을 가지나 릴럭턴스 토크에 의한 큰 토크리플로 인하여 이에 대한 연구는 상대적으로 제한되어 왔다. 그러나, 최근의 전력전자 기술의 발전과 전동기 제어기술의 발달 및 자기회로 설계기술의 발달로 인하여 Spoke Type 영구자석 전동기의 단점은 최소화되고 있으며 특히 단위체적 당 큰 발생토크를 낼 수 있다는 특성으로 인하여 최근 전동기의 소형화 추세에 적합한 것으로 인식되어 이에 대한 연구가 활발히 증대되고 있다 [5]-[7].

따라서 본 논문에서는 Spoke Type 영구자석 전동기의 설계에 필수적인 자기회로 특성을 분석한다. 이를 위해 동일한 회전자 제원으로부터 자기회로 설계 변수인 극수와 영구자석 치수 변화가 공극자속밀도에 미치는 영향을 분석하였다. 또한, 동일한 제원을 갖는 Spoke Type과 SPM Type 전동기의 역기전력 특성으로부터 Spoke Type 전동기와 SPM Type의 자기에너지 밀도를 비교한 후 Spoke Type 전동기의 특성해석을 수행하였다. Spoke Type 전동기의 토크 특성해석을 위해서 유한요소법을 이용하여 역기전력과 자기

\* 正 會 員 : 昌原大 工大 電氣工學科 BK 教授 · 工博  
 \*\* 正 會 員 : 韓國電氣硏究員 電力電子 先任硏究員 · 工博  
 \*\*\* 正 會 員 : 電子部品硏究員, 精密器機硏究센터 責任硏究員 · 工博  
 接受日字 : 2003年 8月 14日  
 最終完了 : 2003年 11月 26日

및 상호 인덕턴스의 공간적 분포 특성을 해석한 후 유한요소법으로 산정한 회로정수를 전압방정식에 적용하여 전류 및 토크 특성 해석하였다. 해석된 결과로부터 Spoke Type 전동기의 자기회로 및 단위 전류 당 토크 향상을 위한 특성을 고찰하였다.

2. Spoke Type 영구자석 전동기의 자기회로 특성

Spoke Type BLDC 전동기의 회전자 자기회로 구성에 따른 공극자속 토크 특성을 유한요소 해석을 통하여 SPM Type과 비교, 분석하였다.

Spoke Type 영구자석 전동기의 구조를 그림 1에 나타내었다. 그림에서와 같은 자화방향을 갖도록 영구자석을 배치하는 이와 같은 전동기에서 영구자석의 폭과 길이 및 영구자석 양 끝단 면에서의 영향과 이에 따른 감자특성 등은 매우 중요하므로 이에 대한 특성고찰이 필요하다. 따라서 동일한 회전자 제원에서 극수와 영구자석 치수를 변경하여 공극자속 및 역기전력, 토크 특성을 분석하였다. 설계변수에 따른 자속밀도 특성 해석을 위한 전동기 제원은 표 1에 나타내었으며 고정자는 평활 철심으로 슬롯고조파가 없는 상태에서 유한요소 해석을 하였다 [5][6].

회전자 직경과 영구자석의 기계적 제원을 일정하게 유지하며 극수 변화에 따른 공극자속밀도 특성을 그림 2에 나타내었다. 해석결과 영구자석 제원이 일정한 경우 극수가 증가할수록 공극자속밀도는 증가한다. 8극에서는 공극자속밀도가 영구자석의 잔류자속밀도와 같아지며 10극에서는 잔류자속밀도보다 증가함을 알 수 있다.

회전자 직경이 일정한 경우 극수가 증가할수록 공극자속 밀도는 증가하였다. 즉, Spoke Type 영구자석 전동기는 영구자석이 직접 고정자와 대향하여 자극표면을 형성하지 않고 회전자 철심이 자극표면을 이루는 형태를 가지므로 각 영구자석에 의해 발생하는 자속을 모아주는 구조를 가지게 되어 극수의 증가는 공극자속밀도의 더 많은 증가의 결과를 가져온다. 결국 이는 한국에 대한 극호 길이와 영구자석의 두께 및 높이에 따라 공극자속밀도는 큰 영향을 받게된다. 따라서 한 극분 극호 길이에 영구자석 높이의 비를 달리함에 따라 공극자속밀도는 달라진다. 또한 영구자석이 양쪽으로 분할하여 구성되어 있으므로 회전자 자극 면보다 영구자석의 면적이 증가하여 표면부착형 영구자석 전동기에 비해 공극자속밀도는 더욱 증가한다.

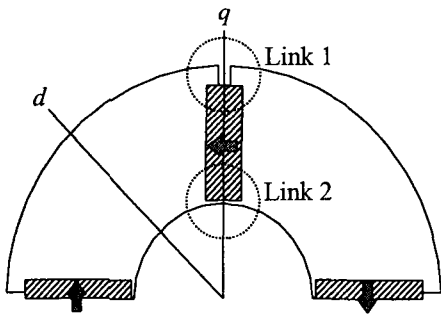


그림 1 Spoke Type 영구자석 전동기 구조  
Fig. 1 The structure of a Spoke Type PM motor

표 1 해석모델에 대한 제원

Table 1 Specifications of the analysis model

회전자 외경	61 [mm]	고정자 외경	106.5 [mm]
공극	0.5 [mm]	잔류자속밀도	0.39 [T]
영구자석 높이	19.64 [mm]	Link 1 두께	1.17 [mm]
영구자석 두께	5.15 [mm]	Link 2 두께	0.74 [mm]

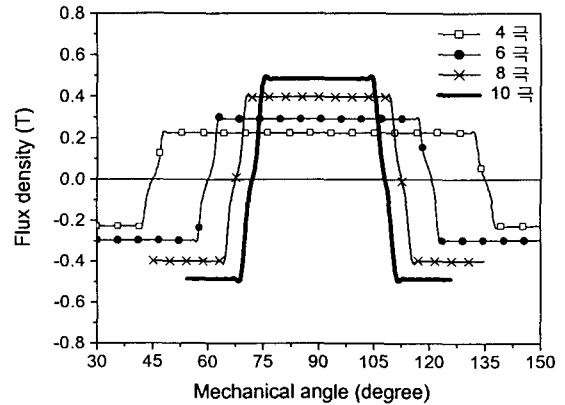


그림 2 극수 변화에 따른 공극자속밀도 분포특성

Fig. 2 Airgap flux density distribution according to pole number

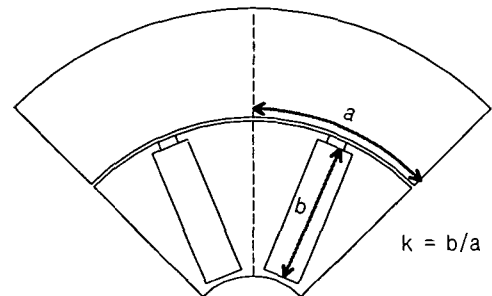


그림 3 PM 높이/극호 길이의 정의

Fig. 3 Definition of PM height/length of pole arc

따라서, Spoke Type 영구자석 전동기의 영구자석 높이와 극호 길이의 비에 따른 공극자속밀도 분석이 요구되어진다.

Spoke Type 영구자석 전동기의 해석을 위한 설계변수 k의 정의를 그림 3에 나타내었다. 해석모델의 제원은 6극과 8극 모델에 회전자 직경을 61[mm]로 하여 k값을 0.4에서 0.8까지 변경하면서 공극자속밀도 특성을 분석하였다.

유한요소 해석으로부터 각 model에서의 k값 변화에 따른 공극자속밀도 분포특성을 그림 4 및 그림 5에 나타내었다. 해석결과 k값이 증가할수록 공극자속밀도는 증가한다. 극수 증가시의 자속밀도 증가와 동일한 현상으로 영구자석의 면적과 자속이 통과하는 자극 표면의 면적비에 의해 공극자속은 증가함을 알 수 있다. 따라서 Spoke Type 영구자석 전동기의 설계시 영구자석의 단면적과 자극표면의 기계적 단면적의 비를 고려하여 공극자속밀도를 산정해야 한다.

회전자 외경은 일정하며 k값이 0.4에서 0.8로 2배 증가하는 경우 즉, 영구자석의 높이가 2배 증가하는 경우 공극자속

밀도도 선형적으로 2배 증가함을 알 수 있다. 따라서 Spoke Type 영구자석 전동기는 자극 표면이 일정하더라도 영구자석의 단면적이 2배 증가하는 경우 자속밀도는 선형적으로 증가하므로 이를 자기회로 해석 및 설계에 반영해야한다.

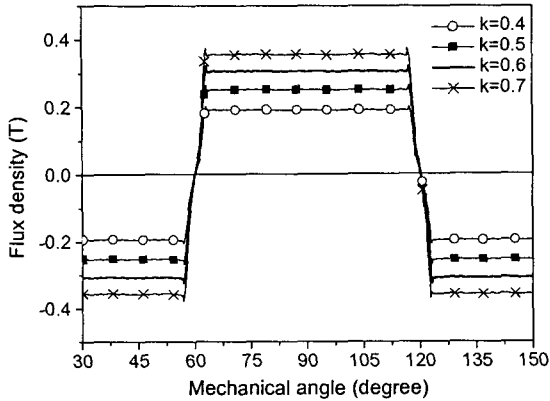


그림 4 k값 변화에 따른 공극자속밀도 분포특성(6극)  
Fig. 4 Airgap flux density distribution according to k(6-pole)

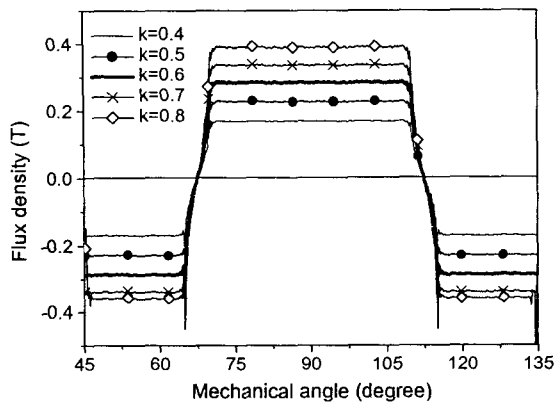


그림 5 k값 변화에 따른 공극자속밀도 분포특성(8극)  
Fig. 5 Airgap flux density distribution according to k(8-pole)

### 3. Spoke Type 영구자석 전동기의 자기회로 설계

Spoke Type 영구자석 전동기는 한 극에서 영구자석이 분할되어 자극의 양 단부에 존재하므로 자속을 발생하는 영구자석의 단면적은 회전자 철심의 자극 표면적과는 다르며 자기회로 해석을 위한 영구자석의 자화방향 길이도 1/2이 된다. 이는 자극의 단면적은 회전자 외경과 극수로부터 결정되지만 자속을 발생하는 영구자석의 단면적은 자극면과는 달리 자속이 회전자극 표면으로 집중하게 된다. 또한 영구자석에 의한 자속의 경로는 표면부착형 영구자석 전동기와는 달리 영구자석-공극-고정자 철심-영구자석으로 구성되므로 회전자를 표면부착형으로 등가화하는 경우 영구자석의 자화방향 길이는 1/2가 됨을 알 수 있다.

Spoke Type 영구자석 전동기의 자기회로 설계를 위한 등가 모델 및 등가 자기회로를 그림 6 및 그림 7에 나타내었다[2]. 여기서  $R$ 은 고정자 외반경,  $R_r$ 은 회전자 외반경,

$l_g$ 는 기계적 공극길이,  $F_a$ 는 고정자 기자력,  $W_m$ 은 영구자석 폭,  $l_m$ 은 영구자석 자화방향 길이이며  $\tau_p$ 는 극간격이다.

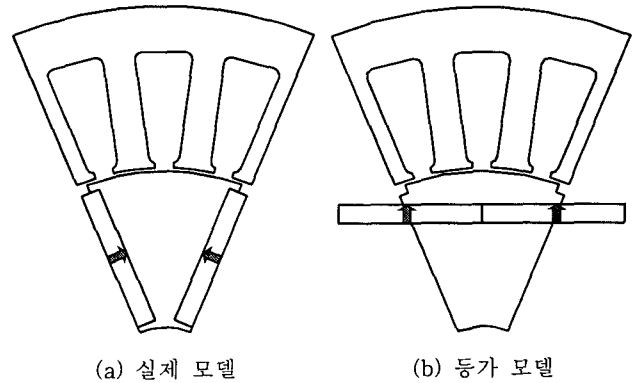


그림 6 Spoke Type 영구자석 전동기 자기회로해석 등가모델  
Fig. 6 Equivalent model of magnetic circuit analysis in Spoke type permanent magnet motor

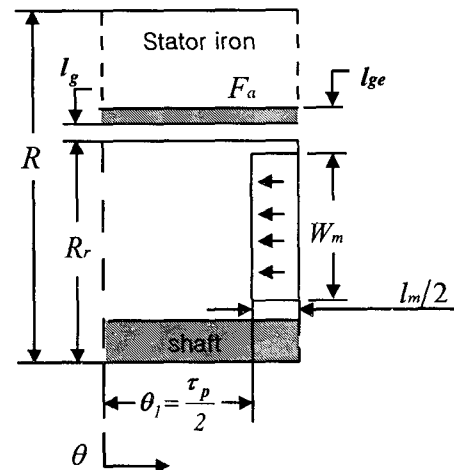


그림 7 Spoke Type 영구자석 전동기의 등가자기회로  
Fig. 7 Equivalent magnetic circuit of Spoke Type permanent magnet motor

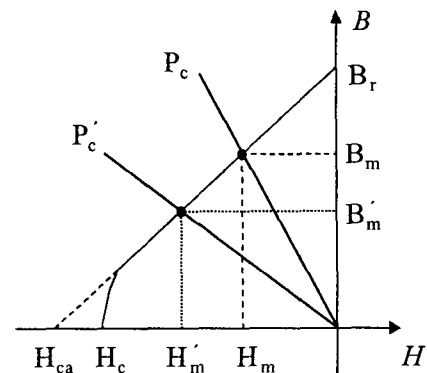


그림 8 영구자석 동작특성  
Fig. 8 Operating characteristics of permanent magnet

영구자석의 무부하 동작점 자속밀도를 산정하기 위한 Spoke Type 전동기의 퍼미언스 Line을 SPM Type 전동기와 비교하여 그림 8에 나타내었다. Spoke Type 전동기의 자기회로 경우 자기회로를 구성하는 영구자석의 자화방향 길이는 SPM Type 전동기의 1/2가 되므로 SPM Type 전동기에 비해 퍼미언스 Line의 기울기가 낮고 동일한 영구자석 재원을 갖는 SPM Type 전동기에 비해 동작점 자속밀도가 낮다. Spoke Type 전동기의 무부하 동작점 자속밀도를 산정하기 위한 퍼미언스 계수는 식 (1)과 같다. 영구자석의 동작점 자속밀도는 낮은 반면 공극자속은 영구자석 양 단부의 자속을 중첩해야 하므로 공극자속밀도는 2장에서의 해석결과와 같이 영구자석의 단면적과 공극의 단면적 비에 따라 달라지므로 공극자속밀도는 식 (3)과 같다. 따라서 Spoke Type 영구자석 전동기는 퍼미언스 계수가 작아 SPM Type 전동기에 비해 외부 자계에 의한 영구자석 불가역 감자가 발생하기 쉬운 구조인 반면 한 극당 영구자석의 등가 면적이 증가함을 알 수 있다.

$$P_c' = f \frac{l_m}{2} \frac{1}{A_m} \cdot \frac{A_g}{l_{ge}} \cdot \mu_0 = \frac{B_m}{H_m} \quad (1)$$

$$2B_m' A_m = f B_g A_g \quad (2)$$

$$B_g = \frac{2B_m' A_m}{f A_g} \quad (3)$$

여기서  $A_g$  는 공극의 단면적,  $A_m$  은 영구자석의 하나의 단면적,  $l_{ge}$  는 carter's 계수로 고려한 등가 공극길이이며  $f$  는 회전자 Link부 누설을 고려한 누설계수로써 등가자기회로 해석에서 Link부 자속밀도는 철심의 포화자속밀도 1.8[T]로 가정하여 Link부 누설 자속을 계산하였다.

#### 4. 특성해석

Spoke Type 전동기는 자속이 회전자극 표면에 집중하는 구조로써 공극 자속 및 역기전력은 극심한 슬롯 고조파 특성이 발생한다. 이러한 역기전력의 고조파 특성은 구형과 전압을 인가하는 경우에도 전류의 고조파 및 토크 ripple이 발생한다. 또한, 영구자석이 회전자 내부에 매입된 구조의 전동기는 d축과 q축의 자기저항 차에 의한 릴럭턴스 토크가 존재하며 이러한 릴럭턴스 토크의 주기는 전자기적 토크의 2배이므로 구형과 구동 Spoke Type BLDC motor에서는 전류의 고조파 성분과 릴럭턴스 토크에 의해 극심한 토크 ripple이 발생할 수 있다. 그러나 릴럭턴스 토크는 3상 bi-polar 구동 BLDC motor에서 전류 통전각을 변화시켜 유효토크로 사용할 수 있기 때문에 Spoke Type BLDC motor의 특성해석을 위해서는 역기전력과 인덕턴스의 공간적 분포특성을 고려한 순시 전류 및 토크 특성해석이 반드시 필요하다.

본 연구에서의 해석 모델은 3상 bi-polar 구동 BLDC 전동기로 구형과 전원을 인가하여 해석하였다.

3상 bi-polar 구동 BLDC motor의 회로방정식으로부터 순시전류 및 토크 특성해석을 위한 Spoke Type 전동기 제원

은 표 2와 같고 해석과정을 그림 9에 나타내었다. 이때 회로정수인 무부하 역기전력과 인덕턴스는 유한요소법을 이용하여 산정하였으며 구형과 전압 구동으로 전류 특성을 산정하였다.

표 2 해석모델의 제원

Table 2 Specifications of the analysis model

극수	8	회전자 직경	61[mm]
상수	3	Link 1	1.15[mm]
공극길이	0.5[mm]	Link 2	0.74[mm]
슬롯수	24	영구자석 높이	19.6[mm]
상당 직렬 도체수	48	자화방향 길이	5.16[mm]
축방향 길이	62[mm]	잔류자속밀도	0.39[T]

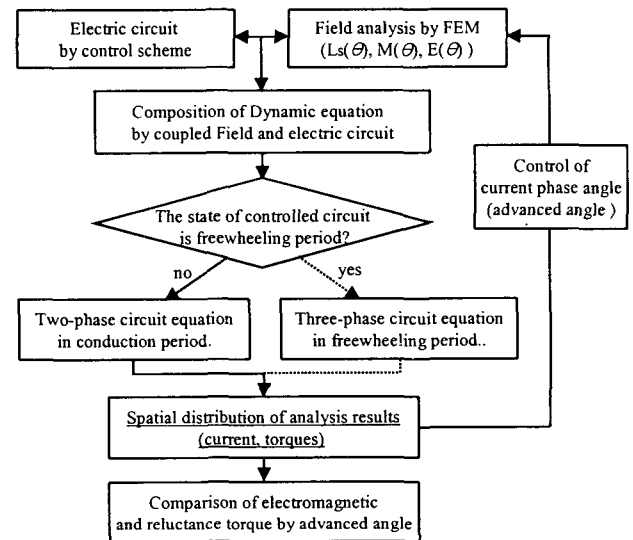


그림 9 유한요소법과 회로방정식의 결합에 의한 순시전류 및 토크 특성 해석

Fig. 9 Instantaneous current and torque analysis by coupled FEM and electric circuit equation

해석과정에서 3상중 2상이 통전되는 도통구간에서의 회로를 그림 10에, 전압 및 전류 방정식은 식 (4)와 식 (5)에 나타내었다[7]-[10].

$$v_a - v_c = \left( Ri_a + \frac{d}{dt}(L - M)i_a + e_a \right) - \left( Ri_c + \frac{d}{dt}(L - M)i_c + e_c \right) \quad (4)$$

$$\frac{d}{dt} i_a = \frac{1}{2(L - M)} (V_a - V_c - e_a - e_c - 2Ri_a) \quad (5)$$

식 (5)에서  $i_a$ 가 구해지면  $i_c$ 는 식 (6)과 같다.

$$i_a = -i_b \quad (6)$$

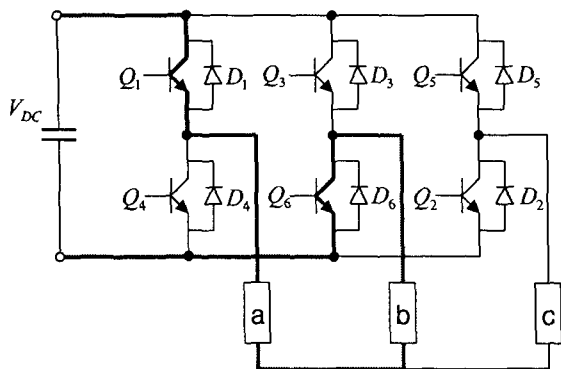


그림 10 도통 구간에서의 전류 흐름  
Fig. 10 Current flow on conduction

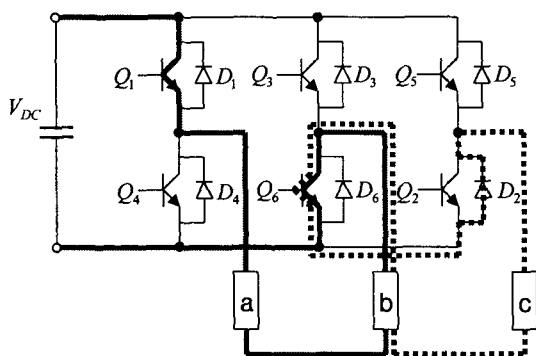


그림 11 전류(commutation) 구간에서의 전류 흐름  
Fig. 11 Current flow on commutation

C상에서 B상으로 전류(commutation)하는 구간에서는 A-C상 off후 A-B상이 통전되며 C상의 전류는 환류 다이오드(freewheeling diode)  $D_2$ 를 통해 흐르게된다. 즉 전류(commutation) 구간에서는 3상 전류가 전동기에 공급되므로 전류 방정식은 식 (7)에, 전류 흐름은 그림 11에 나타내었다.

$$\frac{d}{dt} \begin{bmatrix} i_a \\ i_b \end{bmatrix} = -\frac{R}{L-M} \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_a \\ i_b \end{bmatrix} + \frac{1}{3(L-M)} \begin{bmatrix} 2v_{ac} - v_{bc} - 2e_a + e_b + e_c \\ 2v_{bc} - v_{ac} + e_a - 2e_b + e_c \end{bmatrix} \quad (7)$$

따라서 식 (7)의 해인  $i_a$ 와  $i_b$ 로부터 C상 전류  $i_c$ 는 식 (3)과 같다.

$$i_c = -i_a - i_b \quad (8)$$

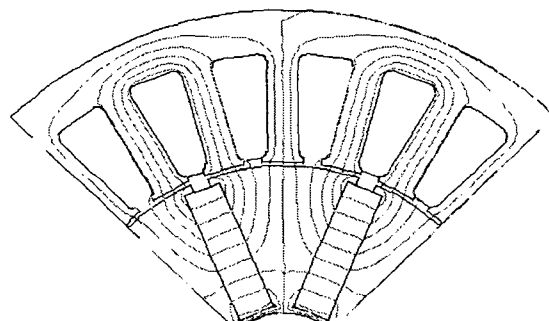
무부하 역기전력과 인덕턴스의 공간적 분포 특성을 이용하여 산정한 전류로부터 Spoke Type BLDC motor의 토크 방정식을 식(9)에 나타내었다. Spoke Type 전동기에서는 자기 인덕턴스 뿐만 아니라 상호 인덕턴스도 회전자 위치에 따라 변하므로 본 논문에서는 이를 고려하여 특성 해석을

수행하였다.

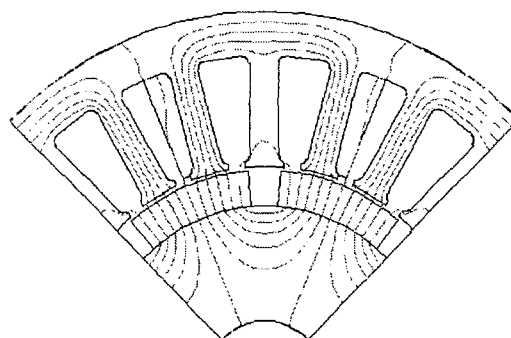
$$T = \frac{(E_a i_a + E_b i_b + E_c i_c)}{\omega} + \frac{1}{2} i_a^2 \frac{\partial L_a(\theta)}{\partial \theta} + \frac{1}{2} i_b^2 \frac{\partial L_b(\theta)}{\partial \theta} + \frac{1}{2} i_c^2 \frac{\partial L_c(\theta)}{\partial \theta} - i_a i_b \frac{\partial M_{ab}(\theta)}{\partial \theta} - i_b i_c \frac{\partial M_{bc}(\theta)}{\partial \theta} - i_c i_a \frac{\partial M_{ca}(\theta)}{\partial \theta} \quad (9)$$

### 5. 자기회로 및 특성해석 결과

Spoke Type 영구자석 전동기의 공극 자속밀도 특성을 동일한 체적의 영구자석을 채용한 SPM Type 전동기와 유한요소법을 이용하여 비교하였다. 유한요소 해석에 의한 Spoke Type과 SPM Type 영구자석 전동기의 등포텐셜 분포도는 그림 12에 나타내었다. Spoke Type 전동기의 경우 자속이 철심으로 구성된 회전자 극 표면에 집중함을 알 수 있다. 회전속도 3000[rpm]에서의 무부하 역기전력 특성을 Spoke Type과 SPM Type 전동기를 비교하여 그림 12에 나타내었다. 동일한 영구자석 체적에서도 Spoke Type 전동기는 SPM Type에 비해 무부하 역기전력이 증가함을 알 수 있다. 따라서 Spoke Type 영구자석 전동기의 자기회로 설계 및 해석에 있어 영구자석의 체적과 기계적 공극의 단면적과 비를 고려해서 공극자속밀도를 해석해야 한다.



(a) Spoke Type 영구자석 전동기



(b) SPM Type 영구자석 전동기

그림 12 등포텐셜 분포도  
Fig. 12 Equi-potential distribution

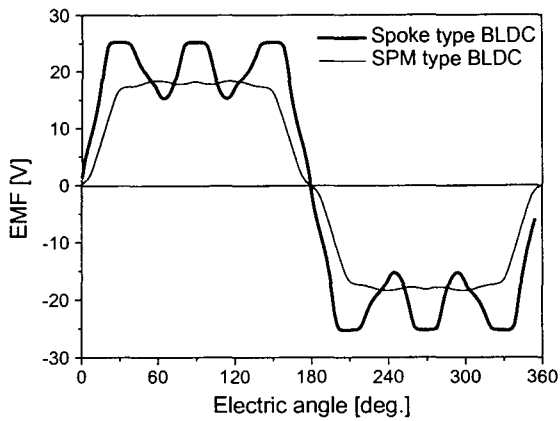


그림 13 회전자 구조에 따른 역기전력 특성(3000rpm)  
Fig. 13 NO-load EMF by rotor structure(3000rpm)

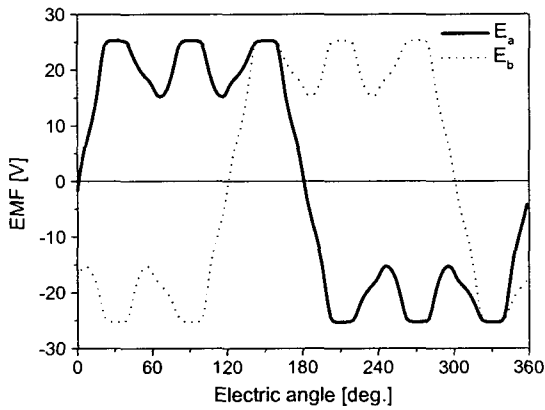


그림 14 Spoke Type 전동기의 역기전력 특성(3000rpm)  
Fig. 14 NO-load EMF of Spoke Type motor(3000rpm)

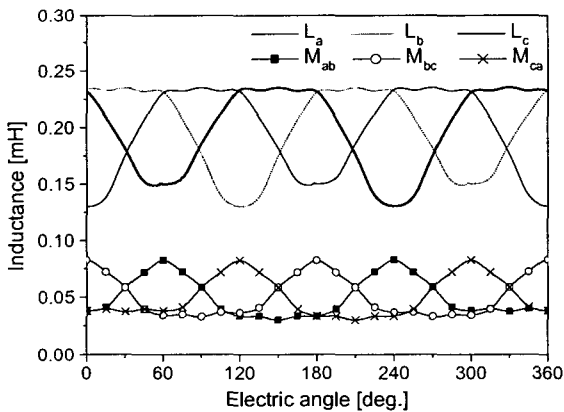


그림 15 Spoke Type 전동기의 인덕턴스 특성  
Fig. 15 Inductance of Spoke Type motor

유한요소법을 이용하여 Spoke Type 전동기의 무부하 역기전력은 그림 14에, 정격전류가 인가되는 상태에서 회전자 위치에 따른 각 상의 자기 및 상호 인덕턴스의 분포 특성은 그림 15에 나타내었다. Spoke Type 전동기의 경우 회전자

위치에 따라 상호 및 자기인덕턴스의 변화가 발생함을 알 수 있다. 이러한 인덕턴스의 공간적 변화는 영구자석에 의한 전자기적 토크 뿐만 아니라 릴럭턴스 토크가 첨가되어 발생한다. 특히, Spoke Type 전동기의 경우 자극 표면으로의 자속 집중에 따른 역기전력의 슬롯 고조파 영향과 회전 각도에 따른 회로정수의 변화에 의해 구형파 전압이 인가되더라도 극심한 고조파 성분을 갖는 전류가 발생한다. 따라서 Spoke Type 전동기의 특성해석에 있어 전류 고조파 성분과 인덕턴스의 변화 특성을 함께 고려하여 특성해석을 수행해야한다.

3상 bi-polar 구동 BLDC 전동기의 경우 각 상은 60° 마다 상 전환을 하며 통전하므로 전기각 30° -90° 구간에서는 a-b상, 90° -150° 구간에서는 a-c상, 150° -210° 구간에서 b-c상이 여자된다. 진상각이 0° 인 경우 각상의 전류 특성을 그림 16에 나타내었으며 a상의 전압, 역기전력 및 전류 특성을 그림 17에 나타내었다. 구형파 전압이 인가되는 경우에도 역기전력의 슬롯 고조파 영향에 의해 극심한 고조파 성분을 갖는 전류가 발생함을 알 수 있다.

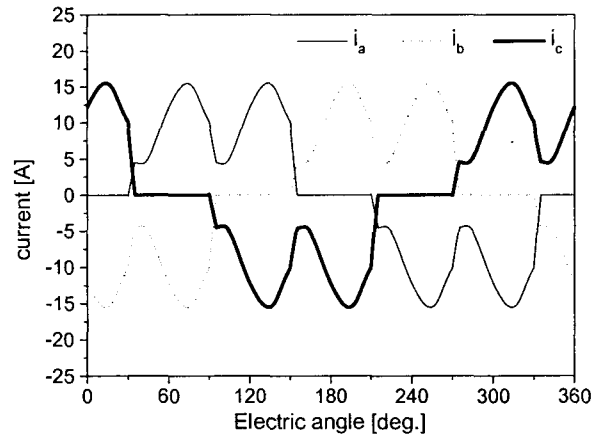


그림 16 전류 특성 (진상각 0° )  
Fig. 16 Current characteristics (advanced angle 0° )

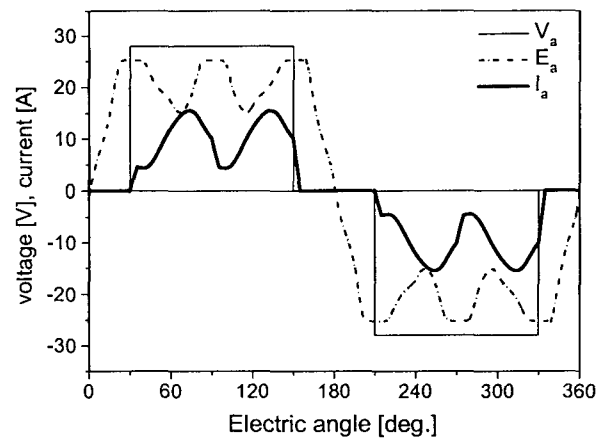


그림 17 a상 전압 및 a상 전류 특성 (진상각 0° )  
Fig. 17 Characteristics of a phase voltage and current (advanced angle 0° )

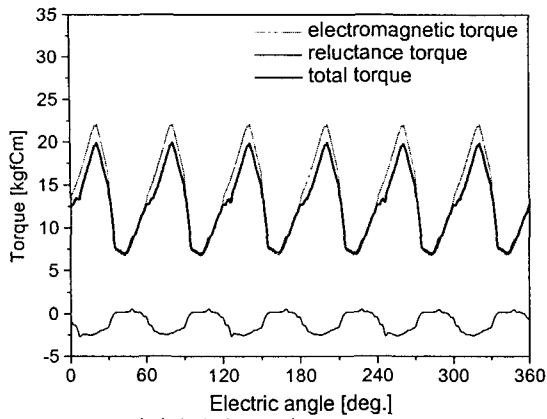


그림 18 토크 특성 (진상각 30°)  
Fig. 18 Torque characteristics (advanced angle 0°)

3상 bi-polar 구동 BLDC 전동기의 경우 각 상은 60° 마다 상 전환을 하며 통전하므로 전기각 30°-90°, 210°-270° 구간에서 a상과 b상이 여자된다. a상과 b상이 여자되는 30°-90° 구간에서 a상 인덕턴스는 증가하는 반면 b상 인덕턴스는 감소하며 상호인덕턴스  $M_{ab}$ 는 30°-60° 구간에서는 증가, 60°-90° 구간에서는 감소하는 특성을 갖는다. 구형과 전류가 흐를 경우 통전구간에서 릴럭턴스 토크 특성은 전자기적 토크의 2배의 주기를 가지며 평균치는 영이 되어 유효토크로 작용하지 못하고 토크 ripple로만 작용하게 된다. 진상각 0°에서 전류 특성과 회로정수의 변화를 고려한 토크 특성을 그림 18에 나타내었다. 릴럭턴스 토크는 (-)값을 가지며 전체 토크는 감소함을 알 수 있다. 따라서 릴럭턴스 토크를 유효토크로 사용하기 위해서는 전류 통전 구간을 진상시켜 릴럭턴스 토크를 (+)값이 갖도록 해야한다.

통전 구간을 30° 진상시킨 경우의 전류 및 토크 특성을 그림 19, 그림 20 및 그림 21에 나타내었다. 구형과 전압이 인가될 때 역기전력이 상승하는 구간에서는 전류는 더욱 증가하게되며 릴럭턴스 토크는 통전 구간에서 모두 유효토크로 작용함을 알 수 있다. Spoke Type 전동기의 전류 특성은 슬롯 고조파 영향에 의해 고조파 성분이 증가하여 토크 ripple이 증가한 반면 진상각 운전에서 전류의 증가에 의한 전자기적 토크의 및 릴럭턴스 토크가 증가하여 발생 토크는 증가함을 알 수 있다.

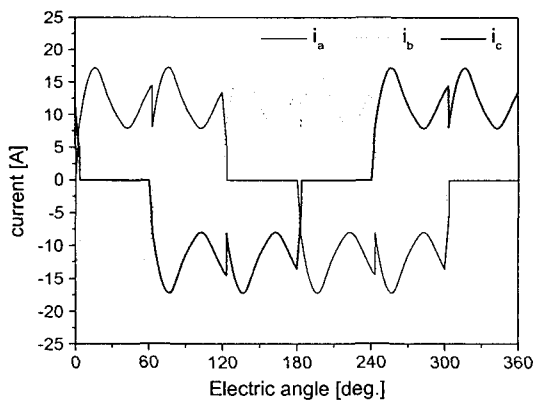


그림 19 전류 특성 (진상각 30°)  
Fig. 19 Current characteristics (advanced angle 30°)

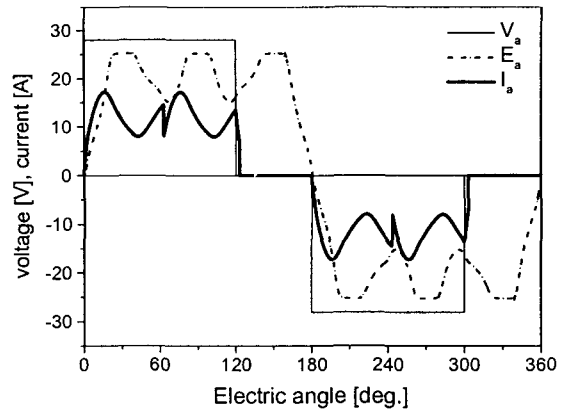


그림 20 a상 전압 및 a상 전류 특성 (진상각 30°)  
Fig. 20 Characteristics of a phase voltage and current (advanced angle 30°)

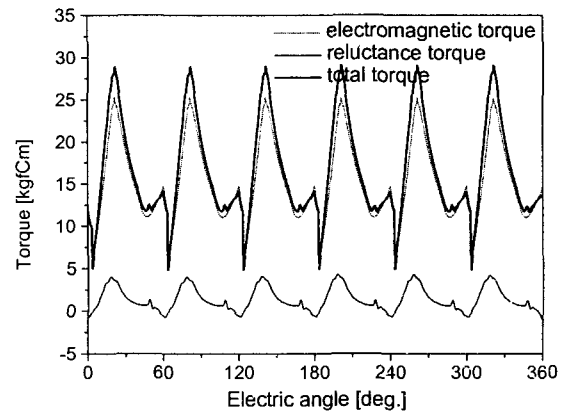


그림 21 토크 특성 (진상각 30°)  
Fig. 21 Torque characteristics (advanced angle 30°)

Spoke Type BLDC 전동기의 자기회로 및 전류, 토크 특성 해석결과 출력밀도가 높고 진상각 운전으로부터 단위 전류당 토크 밀도를 증가시킬 수 있다. 반면 영구자석의 동작점 자속밀도가 낮아 외부 자계에 의한 불가역 감자 현상과 전류 고조파 성분에 의한 토크 ripple의 최소화가 요구된다.

### 5. 결 론

본 논문에서는 Spoke Type 영구자석 전동기의 자기회로 특성을 SPM Type 전동기와 비교하여 분석하였으며 전압방정식으로부터 전류 및 토크 특성해석을 수행하였다. 자기회로 해석을 위해 극수, 영구자석 높이/극호 길이의 비에 따른 공극자속밀도 특성을 분석한 결과 영구자석 높이/극호 길이의 비가 증가할수록 공극자속밀도는 증가하였다. 즉, Spoke Type 영구자석 전동기의 자기회로 설계를 위해서는 영구자석의 등가 단면적과 자극 표면의 면적 비를 고려해서 수행해야만한다.

Spoke Type BLDC 전동기의 자기회로 및 전류, 토크 특성 해석결과 공극자속밀도의 증가에 의한 전자기적 토크의 증가뿐만 아니라 릴럭턴스 토크의 추가 발생에 의해 높은

토크밀도 특성을 가지는 반면 전류 고조파 성분에 의한 큰 토크리플과 영구자석의 불가역 감자 문제가 해결과제이며 이는 다음과제로 삼는다.

참 고 문 헌

[1] T.J.E. Miller, Design of Brushless Permanent Magnet Motor, Clarendo Press, Oxford, 1994

[2] A. Koski and J. T. Eriksson, "Predicting the Performance of a Permanent Magnet Synchronous Motor by Analytical and Numerical Methods", IEEE Trans. on Magnetics, vol. 28, no. 1, pp. 935-938, Janu 1992.

[3] 강규홍, "전기자동차 구동용 매입형 영구자석 동기전동기의 설계 및 특성해석에 관한 연구", 창원대학교 대학원 박사학위논문, 2001년 2월

[4] 강규홍외 2인, "파라미터 변동을 고려한 매입형 영구자석 동기전동기의 특성해석", 대한전기학회 논문지 vol 1. 49, no. 7, pp. 468-474, 2000. 7

[5] Dan M. Ionel et al., "Finite element analysis of brushless DC motors for flux weakening operation", IEEE Trans. on Magnetics, vol. 32, no. 5, pp. 5040-5042, Sep 1996.

[6] S. J. Salon, "Finite Element Analysis of Electrical Machines", Kluwer Academic Publishers, 1995.

[7] M. Sanada, S. Morimoto, and Y. takeda, "Interior permanent magnet linear synchronous motor for high-performance drive", IEEE Trans. on IA., vol. 33, no.3, pp. 966-972, July/Aug. 1997.

[8] G. H. Jang, J. H. Chang, D. P. Hong, and K. S. Kim "Finite-Element Analysis of an Electromechanical Field of a BLDC Motor Considering Speed Control and Mechanical Flexibility", IEEE Trans. on Magn., vol. 38. No. 2, pp. 945~948, Mar. 2002

[9] Motoya Ito, Kaoru Kawabata, Fumio Tajima, and Naganori Motoi, "Coupled Magnetic Field Analysis with Circuit and Kinematics Modeling of Brushless Motors" IEEE Trans. on Magn., vol. 33. No. 2, pp. 1702~1705, Mar 1997.

[10] Renato Carlson, Michel Lajoie-Mazenc, and Joae C. dos S. Fagundes, "Analysis of Torque Ripple Due to Phase Commutation in Brushless dc Machines", IEEE Trans. on IA, vol. 28, No. 3, pp. 632~638, May/June 1992.

저 자 소 개



강 규 홍 (姜 圭 洪)

1967년 11월 5일생. 1992년 창원대 전기공학과 졸업. 1994년 동 대학원 전기공학과 졸업(석사). 1994년~1998년 LG전자(주) 주임연구원. 2001년 동 대학원 전기공학과 졸업(공학박사). 현재 창원대 전기공학과 BK 교수  
Tel : 055-279-8044, Fax : 055-263-9956  
E-mail : ipmsm@korea.com



이 병 국 (李 秉 國)

1968년 12월 25일생. 1994년 한양대 전기공학과 졸업. 1996년 동 대학원 전기공학과 졸업(석사). 2001년 미국 Texas A&M University 전기공학과 졸업(박사). 2001년 12월~2003년 1월 미국 Texas A&M University Postdoctoral Research Associate. 2003년 4월~현재 한국전기연구원 전력전자그룹 근무. IEEE Transactions on Industry Applications, Power Electronics, Industrial Electronics, Energy Conversion 및 IEE Electronics Letters 심의위원, IEEE IAS Industry Drive (IDC) 및 Industry Power Converter Committee (IPCC) 전문위원.  
Tel : 055-280-1416 / Fax : 055-280-1436  
E-mail : bklee@keri.re.kr



허 진 (許 眞)

1968년 11월 13일생. 1999년 한양대 전기공학과 졸업(공학박사). 1999년~2000년 Texas A&M University, Post-doctoral fellow, 2000년~2001년 한양대학교 전기공학과 BK 연구교수, 2002년~현재 전자부품연구원 정밀기기연구센터 책임연구원, 2003년~현재 Senior member of IEEE, Reviewer for several IEEE Trans.  
Tel : 032-621-2844, Fax : 032-621-2855  
E-mail : jinhur@keti.re.kr

감사의 글

본 연구는 산업자원부 지원으로 수행된 중기거점기술개발 사업에 의한 연구결과입니다.