

## 고속용 영구자석형 동기 모터의 설계와 특성 해석

장석명 · 정상섭 양현섭  
충남대학교 전기공학과

### Design and analysis of the characteristics of PM-SM for the high-speed drives

S.M.Jang S.S.Jeong H.S.Yang  
Chungnam Nat'l Univ.

**Abstract** - This paper presents 2-pole permanent magnet synchronous motor(PM-SM) designed for the high-speed drives. Therefore, this motor has the NdFeB permanent magnet as rotor, which is designed simpler than the commercial PM-SM. We treated the developments - design, analysis - of PM-SM.

#### 1. 서 론

초고속 모터는 동급의 출력에 대하여 소형, 경량화가 가능하나 소형 체격이므로 모터내부의 발생열을 최소화해야 한다. 그리고 초고속 운전에 따른 강한 스트레스를 견디도록 기계적으로 강해야 하기 때문에 회전자의 구조가 간단해야 한다. 또한 고속 운전시의 진동을 고려하여 토크리플이 작게 하기 위해 공간 고조파를 최소화하여야 한다.

초고속 구동용에 있어서 농형 유도전동기는 동손 및 철손 등으로 인해 회전자에 열이 많이 발생되어 낮은 효율을 갖게 되므로 적합하지 않다. 따라서 회전자의 구조로 볼 때 릴럭턴스 모터가 가장 초고속 구동에 적합하나 영구자석 모터에 비하여 역률이 낮고 저효율이다. 반면 영구자석 모터는 고효율이며 NdFeB와 같은 고밀도 영구자석이 개발됨에 따라서 점차 출력등급이 향상되고 있지만 영구자석 회전자의 초고속 운전시의 스트레스를 견딜 정도로 충분한 내구성을 가지고 있지 않는 것이 단점이다.

본 논문에서는 초고속 구동에 응용하기 위한 영구자석형 동기모터의 설계와 해석에 대하여 다루었다. 설계에 있어서 NdFeB 영구자석과 이를 취부하기 위한 슬리브 사용에 따른 공극의 증가로 인하여 고효율을 유지하면서 공간 고조파를 최소화시킬 수 있을 것으로 사료된다.

#### 2. 설계 모델과 특성식

##### 2.1 설계 모델

그림 1은 본 설계에서 선정된 모델의 형상이며 그림 2는 고정자 슬롯 형상이다.

##### 2.2 설계 특성식

###### 2.2.1 공극자속밀도

그림 1과 같은 모델에서 영구자석에 의해 발생하는 공극자속밀도는 식(1)과 같다.

$$B_g = \frac{C_\phi}{1 + \frac{\mu_R k_c k_{ml}}{P_c}} B_r \quad (1)$$

여기서  $C_\phi$ : Flux concentration factor,  $k_c$ : 카터 계수,  $k_{ml}$ : 자석의 누설계수,  $P_c$ : 퍼미언스 계수이다.

###### 2.2.2 토크식

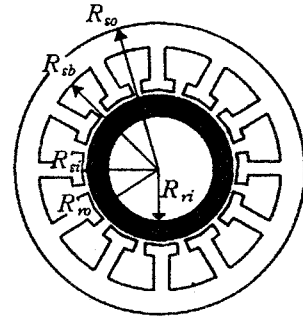


그림 1 BLDC 모터의 설계 모델

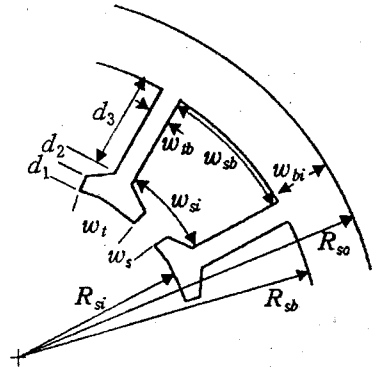


그림 2 고정자의 슬롯구조

모터의 매극 매상당 슬롯수  $N_{spp}$  이고 코일당 턴수를  $n_s$  이라고 했을 때,  $n_{tp} = N_{spp} n_s$  이므로 상당 토크는 식(2)와 같다.

$$T = N_m k_d k_p k_s B_g L R_{ro} N_{spp} n_s i \quad (2)$$

여기서  $k_d$ : 분포계수,  $k_p$ : 단절계수,  $k_s$ : skew 계수,  $L$ : 모터의 축방향 길이,  $B_g$ : 공극자속밀도이다.

###### 2.2.3 역기전력

토크식 (2)와 입출력 관계식  $T\omega = e\dot{\theta}$  으로부터 정격 속도  $\omega_m$  일 때 최대치 역기전력은 식(3)과 같다.

$$E_{max} = N_m k_d k_p k_s B_g L R_{ro} N_{spp} n_s \omega_m \quad (3)$$

따라서 역기전력  $E_{max}$  를 얻기 위해 요구되는 슬롯당 턴수는 식(4)와 같다.

$$n_s = \text{int} \left( \frac{E_{\max}}{N_m k_p k_s k_r B_g L R_{ro} N_{sp} \omega_m} \right) \quad (4)$$

여기서 슬롯당 턴수는 정수이어야 한다. 따라서 실제 역기전력은 식(3)에 의해 다시 계산되어야 한다.

### 2.2.4 상전류

토크식(2)로부터 상전류는 식(5)와 같다.

$$I_{ph} = \frac{T}{N_m k_p k_s k_r B_g L R_{ro} N_{sp}} \frac{1}{N_{ph} N_s} \quad (5)$$

이때 전류 파형은 모터의 운전방법뿐만 아니라 역기전력 파형에 따라서도 달라진다. 또한 이러한 전류치는 동손을 추정하는데 유용하다.

### 2.2.5 상당 저항과 인덕턴스

모터 권선의 상 저항과 인덕턴스는 선택된 권선법의 함수, 코일 끝단 처리, 매상 매극당 턴수에 달려있다. 상저항은 모터의 저항손을 결정하고 상 인덕턴스는 상전류의 최대 변화율을 결정한다. 슬롯 저항  $R_s$  및 코일단 부분에서의 저항값  $R_e$ 는 식(6), 식(7)과 같다.

$$R_s = \frac{\rho n_s^2 L}{k_{cp} A_s} \quad (6)$$

$$R_e = \frac{\rho n_s^2 \pi r_c}{2 k_{cp} A_s} \quad (7)$$

여기서,  $\rho$ : 저항율이다. 따라서, 상당 저항은 상당 슬롯수  $N_{sp}$ 를 고려하여 식(8)와 같이 구하게 된다.

$$R_{ph} = N_{sp}(R_s + R_e) \quad (8)$$

상당 인덕턴스 성분은 공극, 슬롯 그리고 코일단의 세 부분으로 분리하여 고려하여야 한다. 즉, 공극에서의 인덕턴스  $L_g$ 는 식(9)으로 정의된다.

$$L_g = \frac{n_s^2 \mu_R \mu_0 L r_c k_d}{4(l_m + \mu_R k_g B)} \quad (9)$$

여기서  $k_d$ 는 분포 계수이다. 슬롯 누설 인덕턴스  $L_s$ 는 식(10)으로 각각 정의된다.

$$L_s = n_s^2 \left[ \frac{\mu_0 d_3 L}{3 w_s b} + \frac{\mu_0 d_2 L}{(w_s + w_{sb})/2} + \frac{\mu_0 d_1 L}{w_s} \right] \quad (10)$$

또한 코일단 인덕턴스  $L_e$ 는 식(11)로 각각 정의된다.

$$L_e = \frac{n_s^2 \mu_0 r_c}{8} \ln \left( \frac{r_c \pi}{4 A_s} \right) \quad (11)$$

여기서,  $\mu_R$ : 철심에서의 투자율이다. 결국, 상당 인덕턴스 상당 슬롯수를 고려하여 식(12)과 같이 계산한다.

$$L_{ph} = N_{sp}(L_g + L_s + L_e) \quad (12)$$

## 3. 설계 및 제작

### 3.1 설계과정 및 결과

본 연구의 제작모델은 영구자석형 동기모터로서 설계 순서도는 그림 3과 같다.

표 1. 설계 요구사항

항 목	값	단위
Power	1.0	[kW]
정격 속도	30,000	[rpm]
입력 전압	220	[V]
최대 슬롯전류밀도	4	[A/mm <sup>2</sup> ]
상수	3	
극수	2	
영구자석(NdFeB)	$B_r = 1.1(T)$ $H_c = 10,400(Oe)$	

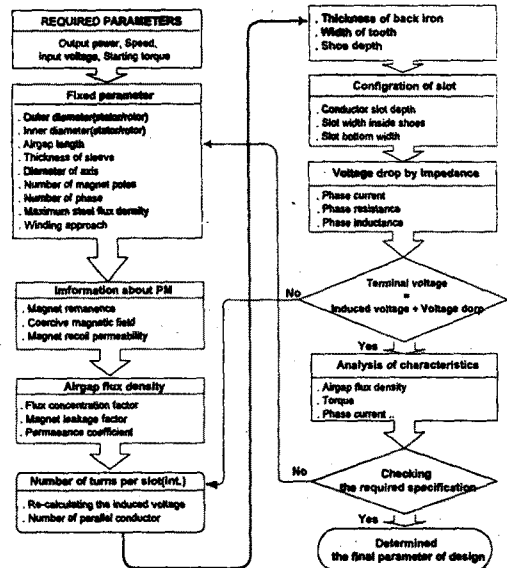


그림 3 영구자석형 동기 모터의 설계 순서도

### 3.2 설계 결과

표 2는 요구사항과 그림 3의 설계 순서에 따라 결정된 설계 파라미터이다.

표 2. 설계 파라미터

항 목	값	단위
고정자 반경, $R_{so}$	35	[mm]
회전자 반경, $R_{ro}$	16	[mm]
공극, $g$	1	[mm]
축 반경, $R_{ri}$	8	[mm]
슬롯 깊이, $d_3$	12	[mm]
shoe 깊이, $d_1 + d_2$	1.4	[mm]
치폭, $w_{sb}$	3.11	[mm]
슬롯폭, $w_{st} (w_{sb})$	3.0(7.0)	[mm]
슬롯당 턴수, $n_s$	14	[turns]
병렬회로수, $a$	4	

#### 4. 특성 해석

##### 4.1 자계 특성

본 절에서는 설계된 PM-SM에 대하여 유한요소해석을 함으로써 설계의 타당성을 확인하였다. 그림 4는 공극에서의 자속밀도 분포를 나타내었다. 본 모델이 일반 BLDC 모터보다 공극길이가 비교적 클에도 불구하고 자속밀도값이 최대 0.8(T)값을 나타내었다. 물론 2차원 FEM 해석이므로 축방향 누설자속은 고려치 않았다.

또한 그림 4의 자속밀도 분포를 FFT에 의한 공간고조파를 확인한 결과 그림 5와 같이 모터 회전자 역토크를 발생시키는 제5고조파, 제11고조파 등이 거의 존재하지 않음을 알 수 있다. 이는 공극 길이가 크기 때문인 것으로 사료된다.

그리고 FEM 해석 결과에 의한 고정자 요크와 치에서의 자속밀도가 1.5(T)로써 허용최대자속밀도인 1.6(T) 이하의 값을 나타내었다. 따라서 코일 전류에 의한 자속을 고려할 때 요크와 치의 폭이 적당함을 알 수 있었다.

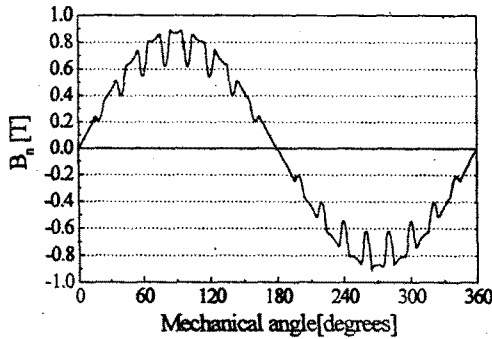


그림 4 공극에서의 반경방향 자속밀도분포

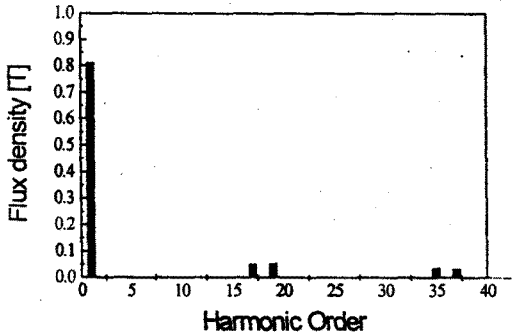


그림 5 공극자속밀도의 고조파 분석

##### 4.2 회로 정수

표 3은 특성식과 FEM 해석에 계산된 상당 등가회로 정수이다. 본 모델의 경우 회전자에 철심이 존재하지 않으므로 상당 인덕턴스는 매우 작았으며, FEM 해석치가 특성식에 의한 계산값보다 컸다. 이는 FEM 해석치 축방향 누설자속에 의한 인덕턴스를 고려치 않았기 때문이다.

##### 4.3 토크 특성

그림 6은 FEM 해석에 의한 부하각에 따른 토크 곡선이다. 요구 사양에 의한 모터 출력 1kW, 3000 rpm에 의해 정격 토크는 0.31(N·m)이다. 따라서 토크 곡선에서 부하각이 60° 일 때 정격토크를 발생함을 알 수 있다.

표 3. 상당 등가 회로 정수

항 목	계산 및 해석치	
	특성식	FEM 해석
유기전력	124.0 [V]	-
저항	0.09 [ $\Omega$ ]	-
인덕턴스	0.181[mH]	0.226[mH]

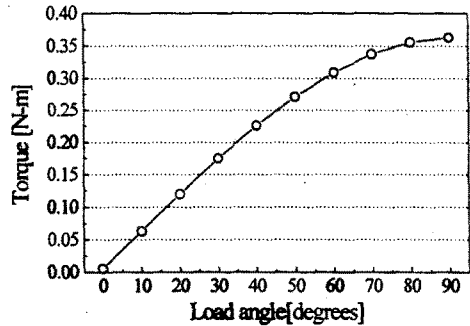


그림 6 부하각에 따른 토크 특성 곡선

#### 5. 결 과

본 논문에서는 고속용 영구자석형 동기 모터의 설계 특성식을 고찰하였으며, 이를 바탕으로 하여 설계를 수행하였다. 제작될 PM-SM 모터는 고속 운전을 위해 회전자 형상을 간단히 하였으며, 효율을 일반 모터의 수준을 유지하면서 공간 고조파 성분을 줄이기 위해 공극길이를 크게 하였다. 설계된 모델의 FEM 해석을 통해 공극자속밀도의 최대값이 약 0.8(T)가 발생하였으며, 슬롯에 의한 공간고조파를 상당히 감소시켰다.

또한 설계된 모델을 FEM 정자계 해석을 통해 부하각에 따른 토크 특성 곡선을 얻었다. 이 결과를 통해 요구 사양의 정격 토크를 부하각 60° 에서 얻을 수 있었다.

따라서 설계된 모터의 제작과 특성 시험을 통하여 본장에서 수행한 설계과정이나 유한해석 등의 타당성을 확인하여 향후 최적의 초고속 모터 설계 및 제작을 위한 기본적인 토대를 마련하고자 한다.

#### (참고 문헌)

- 1) T.Fukao, A.Chiba, "High speed application", IEEE IAS 29th annual meeting, 1994
- 2) Duane C. Hanselman, "Brushless Permanent-Magnet Motor Design", McGraw-Hill, Inc., pp125-137, 1994