

전기 자동차 구동용 매입형 영구자속 동기 전동기의 파라메타 최적 설계

하경호*, 임기재*, 강규홍*, 흥정표*, 김규탁*, 구대현**, 박정우**, 하회두**

* 창원대학교 전기 공학과, ** 한국 전기연구소

The Optimal Parameter Design of Interior Permanent Magnet Synchronous Motor for Electric Vehicle Driver System

Kyong-Ho Ha*, Ki-Chae Lim*, Gyu-Hong Kang*, Jung-Pyo Hong*, Gyu-Tak Kim*

Dae-Hyun Ku**, Jung-Woo Park*, Hoi-Doo Ha**

* Dept. of Electrical Engineering Changwon National University

** Korea Electrotechnology Research Institute

Abstract - In this paper, the optimal design of interior permanent magnet synchronous motors for electric vehicle driver system is achieved to maximize the torque in constant torque region.

Initial design is performed taking into account load characteristics of electric vehicle and we use sequential unconstrained minimization techniques. In the results, the torque in constant torque region is improved about 13.5%.

1. 서 론

정밀 위치, 속도제어와 가변속 운전을 요구하는 FA, OA기기 및 전기자동차 구동용 전동기로써 영구자석을 이용한 교류 서보 전동기의 개발이 국내 외로 활발히 진행되고 있다. 영구자석을 이용한 교류 서보 전동기로는 표면부착형 전동기(Surface Permanent Magnet Synchronous Motor : SPM)와 매입형 영구자석 전동기(Interior Permanent Magnet Synchronous Motor : IPM)로 분류되는데 SPM은 고속회전시 영구자석의 비산 방지를 위한 장치가 고려되어야 하는등의 문제점이 있으나 IPM은 구조적 안정성과 회전자가 들극성을 가지기 때문에 나타나는 릴럭턴스 토크로 인하여 동일한 체적의 영구자석을 이용한 SPM과 비교하여 발생토크가 증가하며, 정출력 운전 영역을 확장시킬 수 있는 장점을 갖고 있다. 전기자동차 구동용 전동기는 부하 특성상 운전영역을 정토오크영역과 정출력영역으로 나누어 구동하고 있으며, 넓은 정출력영역이 요구되기 때문에 IPM이 적합하다. 본 논문에서는 전기자동차 구동용 IPM을 설계하고, 정토오크영역에서 발생토크를 최대화하기 위하여 비제약 최소화기법을 이용하여 최적설계를 하였다.

2. IPM의 초기설계 및 특성해석

2.1 초기설계

전기자동차의 대상 차량에 대한 사양과 주행패턴으로부터 부하특성을 도출하고, 장하분배법을 이용하여 초기설계를 하였으며, 설계된 IPM의 제원을 표.1에 나타내었다.

출력-극수(p)	32kW-4P	고정자 (단위:mm)
기저속도	3000rpm	외경
슬롯수/극,상	3	내경
정격전류(I)	76[A]	적층 폭(L)
상전압(Vmax)	170[V]	슬롯폭
단절율	8/9	치폭
Br	1.12[T]	슬롯 깊이
Hc	21KOe	회전자 (단위:mm)
자극각도	63°	외경
공극(g)	2[mm]	내경(D)
자석 폭	58.6	링크 폭
자석 길이	114	자석 두께
		8.97

표. 1 IPM의 제원

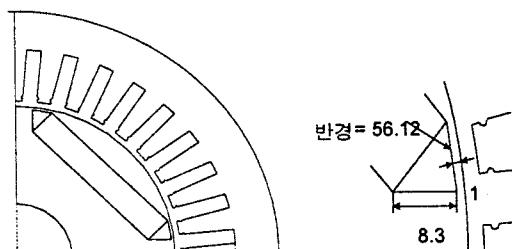


그림 1. IPM의 단면도

고정자의 외경은 전기자동차에 취부를 고려하여 186(mm)로 제한하였으며, 전동기의 상승온도를 100°C정도로 설정하여 영구자석 두께를 선정하였다.

IPM은 d축 리액턴스(X_d)와 q축 리액턴스(X_q)가 다르며, X_d , X_q 는 각각 식(2.1), (2.3)과 같다[1].

$$X_d = X_{ad} + X_\sigma \quad (2.1)$$

$$= \frac{6\mu_0 DL_{shf}}{p^2 g_d''} (k_{w1} N_{ph})^2 + X_\sigma$$

$$g_d'' = \frac{g'}{k_{1ad} - \frac{k_1 k_{ad}}{1 + P_m R_g}} \quad (2.2)$$

$$X_q = X_{aq} + X_\sigma \quad (2.3)$$

$$= \frac{6\mu_0 DL_{shf}}{p^2 g_q''} (k_{w1} N_{ph})^2 + X_\sigma$$

$$g_q'' = \frac{g'}{k_{1aq}} \quad (2.4)$$

2.2 IPM의 특성해석

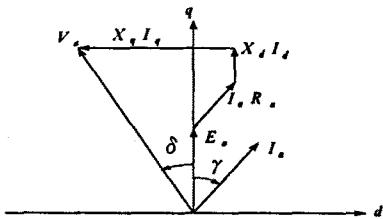


그림 2. 정상상태 벡터도

IPM은 전류의 크기와 위상각을 제어하여 약계자 제어를 하여 정출력영역을 확장시킬 수 있으며, 그림 2.의 벡터도로 부터 전압과 전류의 수식을 다음과 같이 d , q 축 성분으로 나누어 쓸 수 있다.[1][2]

$$I_d = -I_a \sin \gamma \quad (2.5)$$

$$I_q = I_a \cos \gamma \quad (2.6)$$

$$V_d = I_d R_a - I_d X_d \quad (2.7)$$

$$V_q = E_0 + I_q R_a + I_d R_a + I_d X_d \quad (2.8)$$

입력과 출력은 각각 다음과 같으며,

$$W_i = 3[V_a I_q \cos \delta - V_d I_a \sin \delta] \quad (2.9)$$

$$P_0 = 3[E_0 I_q + I_d I_a (X_q - X_d)] \quad (2.10)$$

마그네틱토오크와 릴럭턴스토오크의 합성으로 구해지는 발생토오크는 식(2.11)과 같다.

$$T = \frac{3P}{2W_e} [EI \cos \gamma + \frac{(X_q - X_d) I^2 \sin 2\delta}{2X_d X_q}] \quad (2.11)$$

그림 3은 초기설계한 모터의 전류위상각 γ 의 변화에 따른 토크의 분포이다. 전류 위상각 15° 에서 합성 토크가 최대가 됨을 알 수 있다.

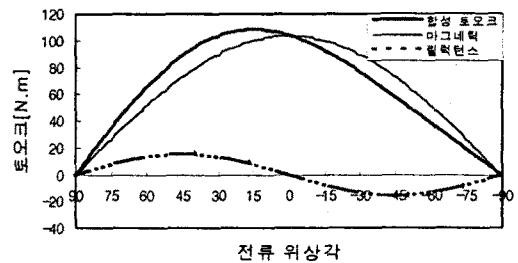


그림 3. 전류위상각에 따른 토크

그림 4는 속도변화에 따른 각 동작 영역의 특성을 나타낸 것이다. 정 토크 구간에서 정격출력이 되는 기저속도 까지의 상승 전압은 최대 공급 전압보다 약 10%정도 낮고, 발생 토크는 104N.m이다.

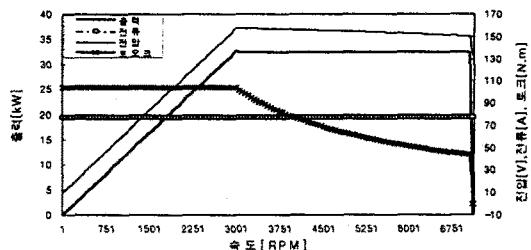


그림 4. 속도 - 토크 특성

정출력영역에서는 인가전압을 일정하게 하고 전류위상각을 조절하여 약계자 운전을 하였으며, 초기 설계모델은 전류위상각 36.5° , 부하각 42.1° 에서 7050[RPM]까지 약계자 운전할 수 있음을 그림5를 통하여 알 수 있다.

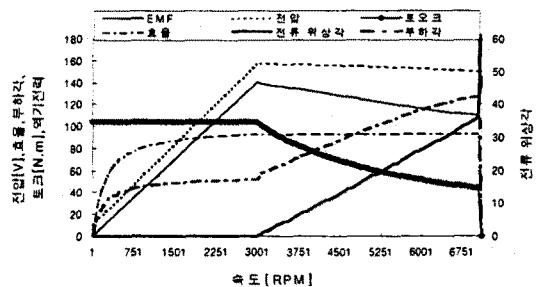


그림 5. IPM 구동특성

3. 최적설계

기기의 제반 특성은 기하학적인 형상과 치수에 의해 결정되어진다. 본 논문에서는 비제약 최소화 기법을 이용하였으며[3], 전기자동차 구동용 전동기의 가속능력을 확보하기 위하여 정출력영역에서 IPM의 최대 토크를 목적함수로 설정하였다.

$$F = T_m(\gamma, \delta)$$

설계변수로는 공극길이와 자석의 극호비(ALPA), 슬롯폭, 치폭을 결정하는 치자속밀도(BT), 링크부의 폭(LINK), 회전자 외경/적층폭의 비로 하였다. 제약조건으로는 고정자의 외경(SD), 슬롯내의 도체점적율(FS), 고온시의 감자계 세기(HD)와 설계변수들에 대한 적정치로 선정하였다. 이를 제약함수를 수식으로 표현하면 다음과 같다.

$$g_1 = SD - b_1$$

$$g_2 = FS - b_2$$

$$g_3 = HD - b_3$$

$$g_4 = LINK - b_4$$

$$g_5 = BT - b_5$$

여기서 b_1 은 186mm이며, b_2 는 0.65, b_3 는 영구자석의 굴곡점 감자계로 9600Oe, b_4 는 1mm, b_5 는 1.8T로 설정하여 최적화를 하였다. 최적화된 기기의 파라미터들은 표2와 같다.

IT	극호비	링크폭	슬롯폭	치폭	슬롯길이	치자속	회전자외경	적층폭	고정자외경	흡수율	흡수율	입력	정선토크	최대토크
0	0.7	1.0	5.26	5.07	17.5	1.8	114	114	183	93.5	32.5	34.8	104	263
1	0.73	0.987	4.72	5.2	19.5	1.74	110	114	182	93.6	32.1	34.3	102	236
2	0.73	0.984	4.68	5.24	19.5	1.73	110	114	182	93.6	32.1	34.3	102	234
3	0.72	0.984	4.76	5.24	19.1	1.73	111	115	182	93.5	32.1	34.4	102	241
4	0.67	0.98	5.35	5.16	17.0	1.76	116	117	183	93.2	32.7	35.1	104	282
5	0.65	0.971	5.59	5.11	16.2	1.78	119	118	184	93	33.1	35.6	105	297
6	0.65	0.965	5.65	5.09	16.1	1.79	119	118	184	93	33.2	35.7	106	300

표 2. 설계 파라미터 최적화

최적설계 결과 회전자 외경과 적층폭은 증가하였으며, 극호비와 링크부의 폭은 감소하였다. 한편, 전동기 입력과 출력은 다소 증가하였으며, 발생 최대토크는 초기설계된 전동기에 비해 큰 폭으로 증가하였다.

그림6에 반복계산 과정의 최대토크, 적층폭 및 회전자외경 변화를 나타내었다. 회전자외경은 114mm에서 119mm로, 적층폭은 114mm에서 118mm로 커졌으며, 최대토크는 초기설계된 전동기에 비해 13.5%증가하여 300N.m가 되었다.

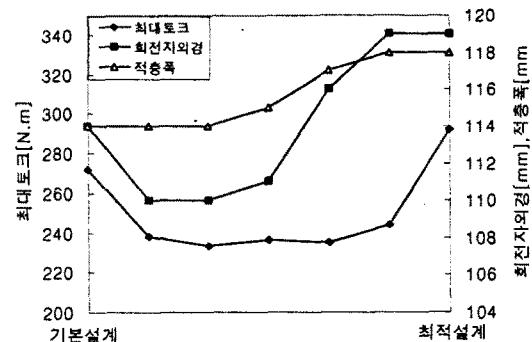


그림 6. 최적화에 따른 설계변수 변화

4. 결 론

본 논문에서는 전기자동차 구동용 전동기에 적용되는 매입형 영구자석 동기전동기를 장하분배법을 이용하여 구동특성을 고려한 설계를 하였으며, 초기 가속능력 향상을 위하여 정토오크영역에서 최대토크를 낼 수 있도록 최적설계변수들을 결정하였다. 최적화 결과 발생 최대토크가 13.5% 정도 증가하였으며, 운전점에서 효율을 최대화할 수 있는 최적설계를 진행하고 있다.

(참 고 문 헌)

- [1] T.J.E. Miller, Design of Brushless Permanent-Magnet Motor, Clarendon Press, Oxford, 1994.
- [2] V.B.Honsinger, "Performance of Polyphase Permanent Machine", IEEE Trans. on Power Apparatus and System, Vol. PAS-99, No. 4, 1980, pp. 1510~1518.
- [3] JASBIR S. ARORA, Introduction to Optimum Design, McGraw Hill, 1989