

마그네틱 토크와 릴럭턴스 토크 비율에 따른 IPMSM의 출력 특성에 관한 연구

권순오*, 이지영**, 방량*, 장봉*, 홍정표*
 창원대학교*, 한국전기연구원*

Study on the characteristics of IPMSM according to the ratio of magnetic and reluctance torque

Soon-O Kwon*, Ji-Young Lee*, Fang Liang*, Peng Zhang*, Jung-Pyo Hong*
 Changwon National University*, KERI**

Abstract - Interior permanent magnet synchronous motor(IPMSM) has higher power density than other PM(permanent Magnet) machines due to reluctance torque in addition to magnetic torque, and the ratio of magnetic and reluctance torque has influences on motor characteristics such as input current, efficiency, power factor, etc. Therefore, this paper presents the output characteristics of IPMSM according to the ratio magnetic and reluctance torque of IPMSM and discuss the design strategy of IPMSM.

1. 서 론

IPMSM은 영구자석에 의한 마그네틱 토크와 자기저항 차에 의한 릴럭턴스 토크를 동시에 이용함으로써 다른 타입의 전동기 보다 높은 단위 전류당 토크를 나타낸다. IPMSM의 설계에서 마그네틱 토크와 릴럭턴스 토크의 설계는 최대 발생토크, 운전 속도, 효율, 전류 등과 밀접한 관계를 갖고 있다. 즉, 요구되는 출력을 만족시키는 동시에 높은 효율, 낮은 입력 전류 등의 특성을 얻기 위해서는 마그네틱 토크와 릴럭턴스 토크에 따른 전동기 출력 특성의 검토가 필요하다. 마그네틱 토크와 릴럭턴스 토크에 따른 IPMSM의 특성은 영구자석에 의한 권선 쇄교 자속과 d, q축 인덕턴스, 전기자 전류에 의해 결정되며 동일한 출력 및 입력전압에서 무한한 조합이 가능하므로 설계 시 어려움이 있다. 따라서 본 논문에서는 IPMSM의 마그네틱 토크와 릴럭턴스 토크에 따른 양상을 파악하여 설계를 효과적으로 하고자 한다.

2. 본 론

2.1 기본 이론

철손을 고려한 d-q 등가회로를 이용한 IPMSM의 전압 방정식은 일반적으로 (1) - (3) 방정식으로 나타내며 전자기적 토크는 (4)로 얻을 수 있다[1].

$$V_s = \sqrt{v_d^2 + v_q^2} = \sqrt{(R_s i_d - \omega L_q i_q)^2 + (R_s i_q + \omega L_d i_d + \omega \psi_s)^2} \quad (1)$$

$$\begin{bmatrix} v_d \\ v_q \end{bmatrix} = R_s \begin{bmatrix} i_d \\ i_q \end{bmatrix} + \left(1 + \frac{R_r}{R_s}\right) \begin{bmatrix} v_{od} \\ v_{oq} \end{bmatrix} + p \begin{bmatrix} L_d & 0 \\ 0 & L_q \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{od} \\ i_{oq} \end{bmatrix} \quad (2)$$

$$\begin{bmatrix} v_{od} \\ v_{oq} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & -\omega L_q \\ \omega L_d & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{od} \\ i_{oq} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ \omega \psi_s \end{bmatrix} \quad (3)$$

$$T = P_s (\psi_s i_{oq} + (L_d - L_q) i_{od} i_{oq}), \quad T_M = P_s \psi_s i_{oq}, \quad T_R = P_s (L_d - L_q) i_{od} i_{oq} \quad (4)$$

여기서 $v_d, v_q, R_s, R_r, i_d, i_q, v_{od}, v_{oq}, p, L_d, L_q, T_M, T_R$ 는 각각, d, q축 전압, 상저항, 철손저항, d, q 축 전류, 저항의 전압강하를 고려하지 않은 d, q축 전압, 시간에 대한 미분연산자, d, q축 인덕턴스, 마그네틱 토크와 릴럭턴스 토크를 나타낸다. 본 논문에서는 정상 상태에서의 특성에 중점을 두었으며 따라서 (2)의 시간에 대한 미분연산자는 0이 된다.

IPMSM은 전류 벡터 제어를 통해 일반적으로 단위 전류당 최대 토크 제어, 약계자 제어를 통해 최대 출력 및 넓은 운전 속도 영역을 얻을 수 있으며 그 특성은 계자의 자속, d-q축 인덕턴스, 전기자의 입력 전류와 밀접한 관계를 갖고 있다. 이러한 특성은 (5)의 관계로 대표될 수 있으며 d축의 전기자 기자력에 의한 쇄교 자속 ($I_f L_q$)와 영구자석에 의한 권선 쇄교 자속이 동일 할 때, 권선 기자력이 더 강할 때, 계자 기자력이 더 강할 때 총3가지 경우에 대해 돌극비 (L_q/L_d)를 고려한 전동기 특성을 검토한다.

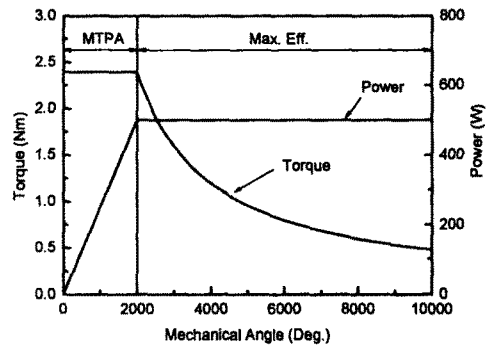
$$\frac{\psi_s}{L_d} = I_f \quad (5)$$

2.2 시뮬레이션 모델 및 조건

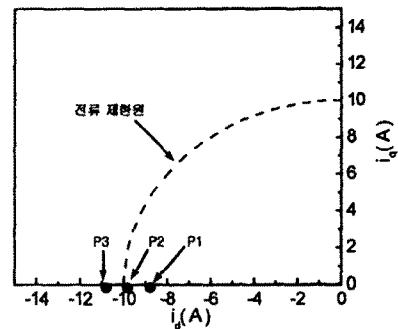
해석 대상모델의 출력 특성은 그림1과 같이 일정 토크 영역은 0 - 2,000rpm에서 2.39Nm를 얻고 일정 출력구간에서는 500W의 출력을 얻는다.

운전 모드는 일정 토크 구간에서 단위 전류당 최대 토크 운전(MTPA: Maximum Torque Per Ampere), 일정 출력 구간에서는 약계자 제어와 함께 최대 효율 운전(Maximum Efficiency)을 가정 하였다.

각 모델의 파라미터는 그림2에 나타낸 바와 같이 d-q 좌표 상에서 최대 전류 제한원을 기준으로 전류 제한원 내부(P1), 전류 제한원과 일치하는 위치(P2)와 외부의 P3에 대해 각각 마그네틱토크와 릴럭턴스 토크의 비율에 따라서 3가지의 경우 총 9경우에 대해 정상 상태의 운전 특성을 검토하였다. 각 모델의 파라미터는 표1에 나타낸 바와 같고 기계손은 무시하였으며 철손저항은 각 경우 전 운전 영역에서 동일하고 d, q축 인덕턴스는 일정하다고 가정하였다. 실제 IPMSM에서는 전류와 그 위상에 따라 d, q축 인덕턴스는 변화하므로 일정한 인덕턴스 조건은 실제와는 거리가 있지만 초기 설계 단계에서는 설계의 방향을 잡는데 유효하다고 판단된다. 실제 인덕턴스의 산정은 자성재질의 포화와 d,q 축 자속의 상호 영향을 고려하여 유한 요소해석으로 산정한다[2].



〈그림 1〉 대상 모델의 출력 특성



〈그림 2〉 대상 모델 파라미터의 위치

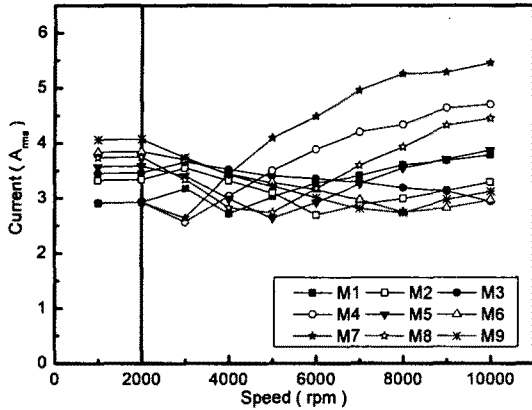
〈표 1〉 대상 모델의 파라미터

a/Ld	Model	a (Wb)	Ld (mH)	Lq/Ld	극수	Ra (m)	Rc (k)	Va (V)	Iam (A)
P1	M1	0.238	29.8	1	4	100	1	120	10
	M2	0.139	17.4	3					
	M3	0.077	9.63	6					
P2	M4	0.238	23.7	1					
	M5	0.139	13.7	3					
	M6	0.077	7.43	6					
P3	M7	0.238	19.8	1					
	M8	0.139	11.6	3					
	M9	0.077	6.42	6					

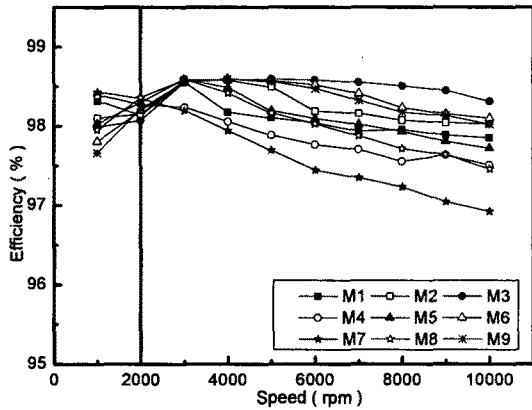
2.3 해석 결과 검토

표1의 파라미터를 d-q 등가 회로 시뮬레이션을 이용하여 특성 해석을 수행하였으며 그림3 - 그림 7에 각 모델들의 입력전류, 효율, 역율, 마그네틱 토크, 릴럭턴스 토크를 비교하였다.

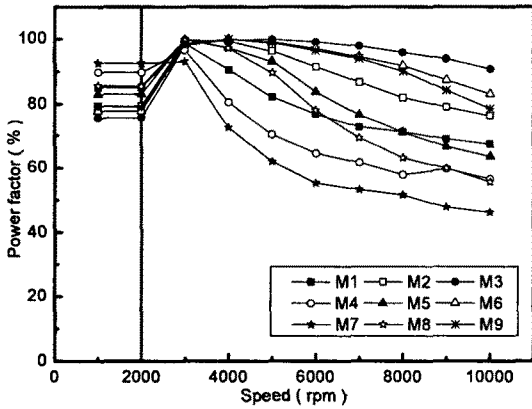
모델의 일정 토크 구간과 일정 출력 구간에서 전류, 효율, 역율 등의 특성을 표2와 3에서 순위를 나타내었다. 순위의 기준은 동일 운전 영역에서 각 물리량의 평균값을 이용하였다.



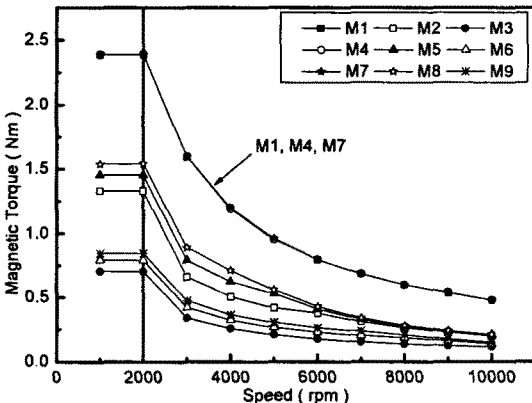
〈그림 3〉 입력 전류



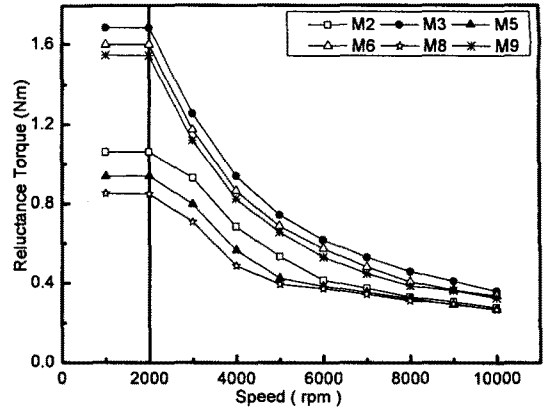
〈그림 4〉 효율



〈그림 5〉 역율



〈그림 6〉 마그네틱 토크



〈그림 7〉 릴럭턴스 토크

〈표 2〉 일정 토크 구간에서 각 모델의 순위

	순위								
	1	2	3	4	5	6	7	8	9
Current	M1, M4, M7	M2	M5	M3	M8	M6	M9		
Efficiency	M7	M4	M1	M5	M8	M2	M3	M6	M9
Power Factor	M7	M4	M8	M1	M5	M2, M9	M6	M3	
Magnetic Torque	M1, M4, M7	M8	M5	M2	M9	M6	M3		
Reluctance Torque	M3	M6	M9	M2	M5	M8	M1, M4, M7		

〈표 3〉 Field Weakening 영역에서 각 모델의 순위

	순위								
	1	2	3	4	5	6	7	8	9
Input Current	M2	M9	M6	M5	M3	M1	M8	M4	M7
Efficiency	M3	M6	M9	M2	M5	M8	M1	M4	M7
Power Factor	M3	M6	M9	M2	M5	M8	M1	M4	M7
Magnetic Torque	M1, M4, M7	M8	M5	M2	M9	M6	M3		
Reluctance Torque	M3	M6	M9	M2	M5	M8	M1, M4, M7		

3. 결 론

본 연구를 통해 IPMSM의 설계를 위한 마그네틱 토크와 릴럭턴스 토크의 비율 결정에서 다음과 같은 결론을 얻을 수 있다.

- 일정 토크 구간에서의 특성 비교로부터 고 토크가 요구 될 경우에는 동일 출력 토크 조건에서 릴럭턴스 토크 보다는 마그네틱 토크의 비율을 높이는 설계가 입력전류, 효율, 역율 측면에서 유리하다.

- 약계자 운전 영역에서는 릴럭턴스 토크의 비율이 높은 M3, M6, M9 모델이 효율, 역율, 입력 전류에서 릴럭턴스 토크의 비율이 적은 경우에 비해 우수한 특성을 나타낸다.

- ψ_a/L_d 의 위치가 전류 제한원을 기준으로 안쪽에 있을 때가 밖에 있을 때 보다 동일 출력 조건에서 우수한 입력전류, 효율, 역율 특성을 나타낸다.

따라서 일정 토크 구간에서 주로 운전 하는 전동기의 경우 마그네틱 토크의 비율을 높이는 설계를, 일정 출력 구간에서 주로 운전하는 경우는 릴럭턴스 토크의 비율을 높이는 설계가 입력전류, 효율, 역율 측면에서 유리할 것으로 판단된다. 또한 일정 토크 구간에서부터 일정 출력 구간까지 다양한 속도에서 운전하는 IPMSM의 경우 마그네틱 토크와 릴럭턴스 토크의 적절한 조합이 필요하다. 이러한 경우의 IPMSM은 SynRM(Synchronous Reluctance Motor)과 영구자석형 동기전동기의 중간적인 위치로 발전 될 것이 예상된다.

본 연구는 산업자원부 지방기술혁신사업(RTI04-01-03) 지원으로 수행되었습니다

〈참 고 문 헌〉

[1] 武田洋次, 森本茂雄, 本田幸夫, "埋込磁石 同期モータ의 設計と制御", Ohmsha, 2001

[2] Ji-Young Lee, Sang-Ho Lee, Guen-Ho Lee, Jung-Pyo Hong, Jin Hur, "Determination of Parameters Considering Magnetic Nonlinearity in an Interior Permanent Magnet Synchronous Motor", IEEE Trans. on Magn., vol. 42, no. 4, April 2006.