

설계 파라미터의 선정에 따른 SRM의 특성 해석

김태형, 문재원*, 안진우, 안영주**
 경성대학교, *RPI, **부경대학교

Performance Analysis of SRM according to Design Parameters

Tae-Hyoung Kim, Jae-Won Moon*, Jin-Woo Ahn, Young-Ju An**
 Kyungsung Univ., RPI*, Pukyong National Univ**

Abstract - In this paper, design and performance analysis of switched reluctance motor(SRM) according to design parameters are researched. The parameters which are sensitive to the performance are examined and selected to have good performances. Some effective guide lines to have a good performance motor are suggested. Prototype machines are constructed to compare with the simulated and tested results.

1. 서 론

스위치드 릴럭턴스 전동기(Switched Reluctance Motor, 이하 SRM)는 고정자 극에만 권선이 위치한 집중권 전동기구조로 SRM은 단위면적당 발생토크가 크고 구조가 간단하여 전동기 구조상 경제적인 장점과 제작이 용이하며, 최근 고용량 전력소자의 개발 및 저가격화로 인하여 SRM의 적용에 대한 연구가 활발해 지고 있다.

이러한 실정에 비하여 SRM의 설계시 전동기의 특성에 영향을 미치는 설계 파라미터가 조합에 따른 성능변화가 심하게 나타나 이를 모두 고려한 설계가 쉽지 않다[1].

본 논문에서는 정격속도 6000[rpm]의 3.5[KW]급 전동기를 예로 선정하여 기존 설계식에 의한 전동기를 제시하고, 제시된 값에서 각각의 설계 파라미터의 변화에 의한 성능 변화를 비교하였고 그 결과를 분석함으로써 전동기 설계에 활용할 수 있도록 한다. 이를 위하여 전동기 설계 파라미터의 변화에 따른 특성을 시뮬레이션하여 구동 특성을 분석하고자 한다.

2. SR 전동기의 설계

SRM은 설계파라미터간의 상호조합에 따라 성능의 변화가 심하게 나타난다. 본 논문에서는 전기자동차 구동용 SRM으로 6000[rpm], 3.5[KW]급 12/8극과 6/4극의 전동기를 설계식에 의해 기본 설계를 수행하고, 이를 근거로 하여 각 파라미터의 변화에 따른 적정 설계치를 제시하고, 성능을 분석하고자 한다.

2.1 회전자외경 및 적층길이의 선정

회전자외경 및 적층의 길이는 아래 식(1)과 같이 출력방정식에 의하여 산출이 가능하다[2][3][5].

$$T = KD_r^2 L_{stk} \quad (1)$$

여기서 K 는 출력계수, D_r 은 회전자외경, L_{stk} 는 고정자의 적층길이를 의미한다.

설계사양에 맞는 적합한 출력을 발생하기 위해 출력식, 식(2)에 의해 출력토크는 5.6[Nm]이상 되어야 한다[5].

$$P = \omega T [W] \quad (2)$$

여기서 P 는 출력, ω 는 각속도, T 는 출력토크를 뜻한다.

출력계수 K 를 구하기 위해서는 식(3)과 같이 단위 회

전 회전자 부피당 토크와 공극 응단력 σ 의 관계에서 식(4)를 유도하여야 한다. 공극응단력, σ 는 단위 회전자 표면적당 접선에 따라 작용하는 힘을 의미한다.

$$TRV = \frac{4K}{\pi} = 2\sigma \quad (3)$$

여기서 TRV 는 단위 회전자부피당 토크, σ 는 공극응단력을 의미한다. 설계목적에 따라 공극의 응단력 σ 를 1로 정하고 식(3)의 관계를 이용하면 K 는 1.57의 값을 가지게 된다[4][6].

이를 식(1)과 식(2)에 대입하여 $D_r^2 L_{stk}$ 를 구할수 있다. 회전자길이와 직경을 따로 구하기 위하여 길이와 직경의 비를 선택하게 되는데 전형적으로 적층길이 L_{stk} 와 보어 반경 D_r 의 비는 1을 사용하게 된다. 비를 이용하여 구해진 회전자외경 D_r 의 값은 83.61[mm]이며, 적층길이의 값 역시 83.61[mm]이다.

2.2 고정자외경의 선정

회전자 외경 D_r 이 산정되면 이를 이용하여 전동기 극수비에 따라 아래 표1에 제시된 비를 근거로 고정자반경을 산출할 수 있다. 본 논문에서 다루고자하는 12/8극과 6/4극 전동기의 외형산출값은 표 2와 같다.

표1. 극수와 회전자대 고정자비 및 극호
 Table.1 Pole and pole arc

Phase	N_s	N_r	D_r/D_s	$B_r(\text{deg.})$	$B_s(\text{deg.})$
3	6	4	0.50	30	32
3	12	8	0.57	16	15
4	8	6	0.53	23	21

여기서 N_s 는 고정자극수, N_r 은 회전자극수, D_s 는 고정자외경, D_r 은 회전자외경, B_s 는 고정자극호각, B_r 은 회전자 극호각을 나타낸다.

표2. 산출된 전동기 치수
 Table. 2. Calculated dimensions

Motor	Dia. rotor	Dia. stator	B_r	B_s	Stack length
6/4	83.61[mm]	167.22[mm]	30°	32°	83.61[mm]
12/8	83.61[mm]	146.69[mm]	16°	15°	83.61[mm]

2.3 공극 및 회전자 파라미터의 선정

SRM에서는 L_{stk}/D_r 비가 1일 때 공극의 길이가 회전자 직경의 0.5%내외의 값을 취하게 되어 제시된 기준전동기에서는 공극길이가 0.41[mm]이다. 공극이 작을 경우 누설자속이 적어 성능면에서는 우수하나 제작시 공극의 유지가 어렵고, 고속영역에서 진동이 심하게 발생한다. 반면 공극의 크기가 클 경우 고속영역에서 진동은 적게 발생하나, 전압-전류 조건이 좋지 못하게 되어 제어에 어려움을 갖게 된다. 이에 본 논문에서는 제작 및 가공

기술을 고려하여 0.2 ~ 0.3[mm]중 제작과 제어면에서 용이한 0.25[mm]를 선정하여 사용한다.

회전자 극높이는 낮은 비정렬인덕턴스를 얻기 위해 공극의 20~30배가 유지하는 것이 좋으며, 식(6)의 회전자 극폭의 1/2배의 값을 가지며 회전자 극폭은 아래 식(5)과 같이 얻어진다.[3][6]

$$d_r = t_r / 2 [mm] \quad (5)$$

$$t_r = 2r_1 \sin \frac{\beta_r}{2} [mm] \quad (6)$$

여기서 t_r 은 회전자극폭, r_1 은 회전자 외부반경, d_r 은 회전자 극높이를 뜻한다.

식(5)와 극폭에 따른 극높이의 비율을 통해 얻어진 회전자 극높이는 12/8극이 5.82[mm], 6/4극이 10.82[mm]이다. 회전자 요크두께는 포화없이 최대 자속을 흘리기 위해 충분해야 하며 $t_r/2$ 보다 큰 20~30%의 값을 사용하며, 기준으로 제시되는 값은 아래 식(7)과 같다. 이를 통해 계산한 회전자 요크두께는 각각 12/8이 7.76[mm], 6/4가 14.42[mm]이다[3][6].

$$y_r = \frac{2}{3} t_r [mm] \quad (7)$$

여기서 y_r 은 회전자 요크두께를 의미한다.

회전자 축의 산정은 아래 식(8)을 통하여 산정할 수 있으며 청각적 소음을 줄이기 위해서는 허용범위 내에서 최대로 설정하는 것이 바람직하다. 식(8)에 의해 얻어진 각 전동기의 회전자 축직경 D_{sh} 은 12/8극이 56.45[mm], 6/4극이 33.13[mm]이다.

$$D_{sh} = D_r - 2(d_r + y_r) [mm] \quad (8)$$

2.4 고정자 파라미터의 선정

고정자의 파라미터의 선정에서 중요한 것은 고정자 요크의 크기로 회전자요크와는 달리 여자시 가진력에 의한 고정자의 진동소음을 최소화 하기 위하여 회전자에 비해 두껍게 하게 된다. 이에 일반적으로 고정자 극폭의 2/3 크기로 산정된다. 식(9)으로 고정자 극폭을 계산할 수 있으며 비례값을 이용하여 계산한 기준전동기의 고정자 요크의 크기는 12/8극이 7.32[mm]이고 6/4극이 15.47[mm]이 된다[6].

$$t_s = 2(r_1 + g) \sin \frac{\beta_s}{2} [mm] \quad (9)$$

여기서 t_s 는 고정자극폭, g 는 공극이다.

고정자 슬롯길이 d_s 는 식(10)과 같으며 이미 선정된 파라미터의 값에 의해 자동적으로 결정된다. 계산에 의한 값은 12/8극이 23.96[mm], 6/4극이 26.08[mm]이다.

$$d_s = \frac{1}{2}(D_s - D_r - 2(g + y_r)) [mm] \quad (10)$$

2.5 설계식에 의한 전동기의 사양 및 성능

표3은 2절에서의 설계식에 의해 산출된 계산한 각각의 파라미터를 정리한 것이며 표4는 각 전동기의 출력 및 토크와 효율을 나타낸다.

3. 설계 파라미터에 따른 성능 시뮬레이션

제시된 설계식에 따른 전동기의 각 요소를 변화시켜 그 변화에 따른 성능추이를 살펴보고자 한다.

3.1 극호각에 따른 성능

SRM에서의 극호각의 변화는 아래의 몇가지 사항에 관해 유념하여야 한다[2][3][4].

정토크발생구간의 감소없이 슬롯면적을 크게 하기 위해서는 식(11)에서 제시된 조건을 만족하여야 한다. 넓은 토크 발생구간을 가지기 위해서 고정자 극호각을 넓히게 될 경우 고정자 극사이가 좁아져 슬롯면적을 감소하게

된다.

표 3. 설계식에 의한 전동기 파라미터

Table 3. Design parameters according to conventional design

파라미터	6/4	12/8
Dia. stator[mm]	167.22	146.69
Dia. rotor[mm]	83.61	83.61
Stack Length[mm]	83.61	83.61
Airgap[mm]	0.25	0.25
N _r	4	8
N _s	6	12
Phase	3	3
Rotor pole arc[deg.]	30	16
Stator pole arc[deg.]	32	15
Stator yoke[mm]	15.47	7.32
Dia. shaft[mm]	33.13	56.45

표4. 설계식에 따른 전동기의 시뮬레이션 결과

Table 4. Simulation results of prototype motor

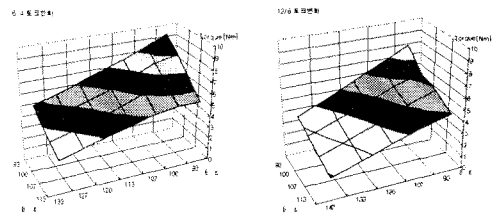
Motor	6/4	12/8
Output [Kw]	4.10	3.52
Efficiency [%]	89.65	84.23
Torque [Nm]	6.52	5.60

$$\beta_s \geq \beta_r \quad (11)$$

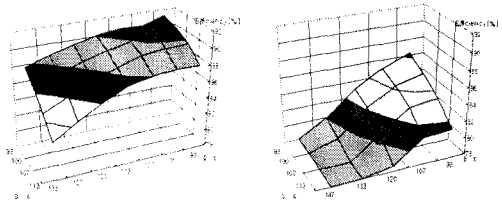
상여사시 전구간에서 토크발생을 위해서는 식(12)와 같은 조건을 만족해야 한다. 비정렬위치상에서 상여사시 고정자와 회전자의 접촉이 없다면 자기기동이 불가능 하게 된다.

$$\text{Min}(\beta_s, \beta_r) \geq \epsilon \quad (12)$$

제시된 조건을 바탕으로 시뮬레이션을 하였으며 시뮬레이션 결과를 극호각 대 스트로크각의 비율로 환산하여 아래 그림1과 같이 3차원 곡선으로 나타내었다.



(a) torque(6/4) (b)torque(12/8)



(c) efficiency(6/4) (d) efficiency(12/8)

그림 1. 극호각 변화에 따른 성능

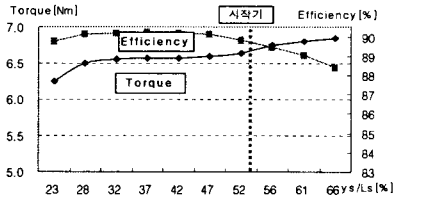
Fig. 1 Performance according to stator and rotor pole arc

이 결과는 식(11)이 12/8극, 6/4극에서 적합하게 적용됨을 보여준다. 회전자와 고정자의 극호각 중 동일한 인덕턴스구간을 가지더라도 회전자의 극호가 큰 쪽이 슬롯면적의 확보뿐만 아니라 토크, 출력, 효율면에서 고정자 극호가 큰 쪽보다 유리하다는 것을 알 수 있다 또한 그림 [a]와 [b]영역에서 각 극호각과 스트로크각과의 비가 1보다 작은 구간은 모든 출력요소에서 높은 값을 나타내었으나 자기기동이 안되는 구간이 발생하게 된다. 시뮬레이션 결과 회전자 극호가 고정자 극호에 비해 10%정도

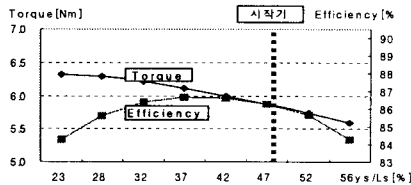
큰 것이 우수한 성능을 가지는 특성을 보였다.

3.2 고정자 요크두께에 따른 성능

출력방정식에 의하여 회전자 직경은 토크에 직접적인 영향을 주므로 동일한 속도에서 동일한 출력을 얻기 위해서는 회전자 직경의 크기가 변화해서는 안된다. 그러므로 크기가 고정된 고정자 외경과 회전자 외경에서 고정자 요크를 변화시킬 경우 고정자의 극높이도 비례적으로 변화하게 된다.



(a) 6/4 pole



(b) 12/8 pole

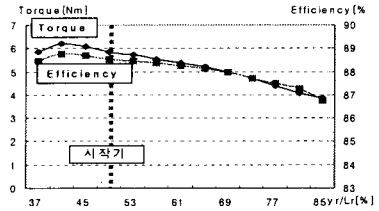
그림 2. 고정자 요크두께에 따른 성능
Fig. 2 Performances according to stator yoke

그림2는 고정자외경에서 고정자내경을 제외한 길이 L_s 가 일정한 상태에서 고정자요크의 크기 변화에 따른 출력을 나타낸 것이다.

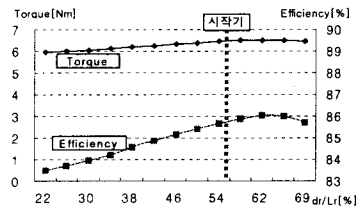
시뮬레이션 결과 6/4극 SRM과 12/8극 SRM의 특성변화가 크게 다르게 나타났다. 그러나 설계식에 의해 선정되었던 고정자 요크의 값에서 6/4극의 경우 효율과 토크 모두가 다른 지점에 비하여 좋게 나타났으며, 12/8극의 경우 다른 지점에 비하여 토크의 크기가 요구치에 만족하게 나타났다. 또한 12/8극 경우 효율면에서 선정되었던 지점이 다소 낮게 나타났으나 다른 지점의 효율과 큰 차이를 보이지는 않았다. 이에 실험식에 의해 제시되었던 고정자요크의 비율이 유효함을 알 수 있었다.

3.3 회전자 요크두께에 따른 성능

3.2절에서 밝힌 바와 같이 회전자의 직경은 토크에 직접적인 영향을 미치므로 본 절의 시뮬레이션에서도 회전자의 크기는 고정된 상태에서 회전자의 요크만을 변화하여 그 성능을 변화를 시뮬레이션하였으며 그 결과 그림 3과 같은 변화가 발생하였다. 시뮬레이션 결과 설계식에서 회전자요크 두께는 고정자요크 두께를 시뮬레이션 하였을 때와 같이 상이한 결과를 보였다. 그러나 성능면에서 토크요구치에는 6/4극과 12/8극 전동기가 모두 만족하였다. 여기서 L_r 은 회전자외경에서 회전자축직경을 제외한 길이를 의미한다.



(a) 6/4 pole



(b) 12/8 pole

그림 3. 회전자 요크두께에 따른 성능
Fig. 3 Performances according to rotor yoke

4. 시작기의 설계

시뮬레이션을 통해 얻은 결과를 바탕으로 각 부분에서 우수한 성능을 보였던 지점을 선정하여 3.5[KW]급 6/4극 전동기와 12/8극 시작기를 설계하였으며 그 성능은 표5 과 같다. 시뮬레이션의 결과를 바탕으로 그림 4와 같이 실제 전동기와 제어기를 제작하였다.

표 5. 시작기의 성능
Table. 5 Performance of prototype motor

구분	6/4	12/8
출력 [Kw]	3.55	3.54
효율 [%]	85.16	80.25
토크 [Nm]	5.66	5.51

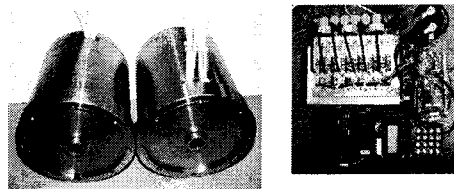


그림 6. 제작된 시작기 및 제어기
Fig. 6 Prototype motors and Controller

그림 8과 그림9는 시작기와 제작된 제어기를 이용하여 측정된 시작기의 성능을 나타내고 있다. 출력 및 토크, 효율을 보면 설계값에 6/4극과 12/8극이 정격속도인 6000[rpm]에서 3.5[KW]에 다소 미치지 못하는 성능을 보이고 있으나 인버터 손실, 측정오차등을 고려할 때 설계에 따라 양호하게 설계 및 제작되어진 것으로 판단된다.

[참 고 문 헌]

- [1] Harris, M. R. and Miller, T.J.E., "Comparison of design and performance parameters in switched reluctance and induction motors. IEEE Fourth International", Conference on Electrical Machines and Drives, 13-15 September, 1991, 303-307
- [2] P. J. la wrenson, J. M. Stephenson and P. T. Blenkinsop et al, "Variable-speed Switched Reluctance Motors", IEE Proc. B, vol.127, no.4, 1980
- [3] P. Hammond, T.J.E Miller, S. Yamamura, "Switched Reluctance Motors and their control", Magna physics publishing and clarendon press, 1993
- [4] R. Krishnan, R. Arumugam, and J.F. Lindsay, "Design procedure for switched-reluctance motors", IEEE transe. on industry appl. 24(3), 456-461, 1988.
- [5] R. Krishnan, "Switched Reluctance Motor Drive-Modeling, Simulation, Analysis, Design, and Applications", CRC Press, 79-149.
- [6] 안진우, "스위치드 릴럭턴스 전동기", 오성미디어, 2004
- [7] 김태형, 문재원, 안진우, "SRM의 설계파라미터 변환에 따른 성능해석", 대한전기학회 전기기기 및 에너지 변환시스템학회 추계학술대회, 2003.10.
- [8] 김태형, 문재원, 안영주, 안진우, "설계변수 조정에 의한 SRM의 성능특성", 대한전기학회 부산울산경남지부 합동학술대회, 2003.11.

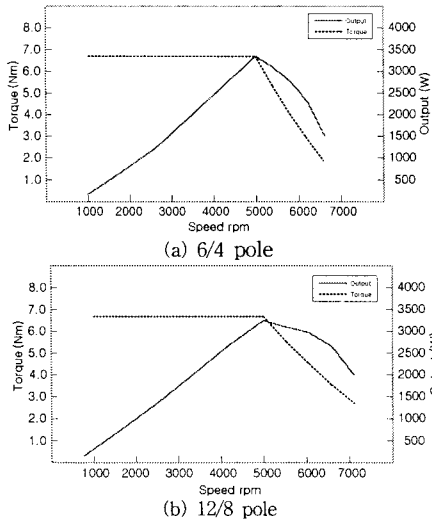


그림 8. 시작기의 속도-출력곡선
Fig. 8 Speed and power of prototype motor

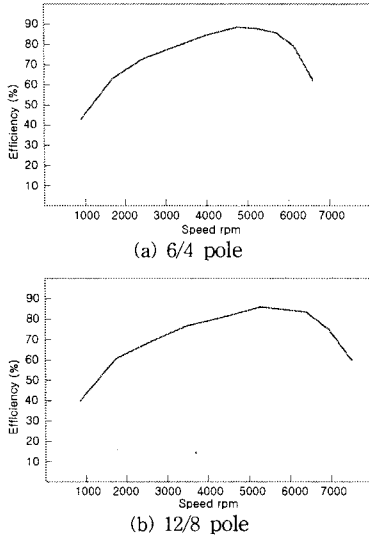


그림 9. 시작기의 속도-효율곡선
Fig. 9 Speed-efficiency of prototype motor

5. 결 론

본 논문에서는 SRM의 설계 파라미터의 조정에 따른 성능의 변화를 분석하였다. 이에 설계식에 의한 산출방법을 보이고, 유효범위를 제시하였다. 그리고 제시된 유효범위내에서 각 파라미터의 값을 변경하면서 시뮬레이션 성능의 특성변화를 파악하였다. 이 결과를 바탕으로 각 파라미터간의 비율로 우수한 성능을 가지는 범위를 제시하였다. 이를 증명하기 위해 제시된 각 유효범위내에서 적절히 설계파라미터를 조합하여 시작기를 설계하고 그 성능을 시뮬레이션 하였으며 결과를 바탕으로 시작기를 제작하여 실험하였다.

실험결과 제작된 제시된 범위 내에서 제작된 전동기는 요구성능에 만족할 수 있었으며 이를 통하여 제시된 범위의 유효함을 증명하였다.