

동기형 릴럭턴스 모터의 설계

장석명, 문정술, 서진호, 정상섭, 성세진
충남대학교 전기공학과

Design of the Synchronous Reluctance Motor

S.M. Jang, J.S Moon, J.H. Seo, S.S.Jeong, S.J. Seong
Chungnam Nat'l Univ.

Abstract - Synchronous Reluctance Motors(SynRM) with multiple flux barrier structures are considered in this paper. Since the stator of a SynRM is similar as that of an inductin motor, attention is focused here on the rotor structure. We have designed the parameter of SynRM and analyzed the characteristics of the electromagnetic energy conversion.

1. 서 론

동기형 릴럭턴스 전동기(Synchronous Reluctance Motor; 이하 SynRM)는 전자기적 에너지를 회전자에서 릴럭턴스 토크로 변환시킬 수 있도록 구성된 전기기기이다. SynRM의 고정자는 유도전동기와 유사하지만, 회전자는 돌극의 형태를 갖는다. SynRM은 SRM (Switched Reluctance Motor)과 같이 가변속 구동이 가능하며, 고정자권선에 의해 매우 정현적인 회전기자력을 발생시킴으로써 소음이나 토크 리플 등의 단점을 크게 개선시킬 수 있는 장점이 있다.

본 논문에서는 flux barrier rotor를 갖는 SynRM의 설계과정을 살펴 보았고 I.Boldea에 의해 제안된 설계 수순을 통한 시뮬레이션을 통해 모터의 체적값을 결정하였으며 이를 바탕으로 각 특성을 검토하였다.

2. SynRM의 기본 특성식

2.1 회전자의 특성

SynRM의 고정자는 유도 전동기와 실제적으로 같기 때문에, 여기서는 회전자 구조를 중심으로 특성을 해석하기로 한다. 회전자의 구조는 일반적으로 다음 요구 조건이 만족되어야 한다.

① d축 자속은 고정된 공극 길이에서 큰 자화 인덕턴스를 얻기 위해 전체 극 표면을 가로질러 흘러야 한다.

② q축 자속은 적은 quadrature를 얻기 위해 최소

화 되어야 한다.

2.2 SynRM의 d·q축 방정식

SynRM 고정자 권선은 정현적으로 분포되기 때문에 SynRM의 지배방정식은 일반적인 동기 전동기의 지배방정식으로부터 유도할 수 있고, 계자 권선이 존재하지 않는다. 또한 현재의 축방향으로 성층된 회전자 구조를 채택하고 있는 경우에는 인버터 제어에 의해 기동을 할 수 있기 때문에 회전자 cage는 일반적으로 생략된다. 따라서 계자권선에 대한 방정식을 생략하고 SynRM의 d·q 방정식의 기초가 되는 식(1)과 같은 Park's 방정식을 취할 수 있다[1].

$$\begin{aligned} V_{ds} &= r_s i_{ds} + p\lambda_{ds} - \omega_r \lambda_{qs} \\ V_{qs} &= r_s i_{qs} + p\lambda_{qs} + \omega_r \lambda_{ds} \end{aligned} \quad (1)$$

$$\begin{aligned} \lambda_{ds} &= L_k i_{ds} + L_{md} i_{ds} \\ \lambda_{qs} &= L_k i_{qs} + L_{mq} i_{qs} \end{aligned} \quad (2)$$

여기서 L_k, L_{md}, L_{mq} 는 각각 고정자 누설 인덕턴스, 직축 자화인덕턴스, 횡축 자화인덕턴스이다.

2.3 SynRM의 기본 특성식

설계에 이용된 각 파라미터의 기본 특성식을 살펴 보면 다음과 같다[2]. 먼저 SynRM에서 회전력을 발생시키는 암페어턴을 식(3)와 식(4)와 같이 직축 성분과 횡축성분으로 구분하여 계산한다.

슬롯 암페어턴의 직축성분은

$$n_s I_{dm} = \frac{B_{1dm} \pi P_1 g k_c (1 + k_s)}{\mu_0 3\sqrt{2} P_1 a k_{wl} k_{dm1}} \quad (3)$$

여기서, B_{1dm} :공극 자속밀도, g :공극, k_c :카터계수, k_s :포화 계수, k_{wl} :권선계수 k_{dm1} :자속 밀도비이다.

슬롯 암페어-턴의 횡축성분은

$$n_s I_{qm} = n_s I_{dm} \sqrt{\frac{L_d}{L_q}} \quad (4)$$

따라서 전체 슬롯의 암페어턴 성분은 식(5)와 같다.

$$n_s I_m = \sqrt{(n_s I_{dm})^2 + (n_s I_{qm})^2} \quad (5)$$

또한 자화 인덕턴스는 식(6)과 같게 된다.

$$L_m = \frac{6\mu_0 \tau L (P_1 q n_s k_w)^2}{\pi^2 P_1 g k_c (1 + k_s)} \quad (6)$$

여기서, L : stack 길이, n_s : 슬롯당 권선수이다.

기본 속도에서의 토크는,

$$T_{em} = 3 \cdot P_1 (L_d - L_q) n_s I_{dm} (n_s I_{qm}) \quad (7)$$

여기서, L_d : 횡축 인덕턴스, L_q : 직축 인덕턴스이다.

역율 및 효율의 곱은 식(8)과 같다.

$$(\eta \cos \varphi)_b = \frac{(T_{em} \omega_b / P_1)}{3 V_{rph} I_m} \quad (8)$$

여기서, I_m : 고정자 상전류, V_{rph} : 정격 상전압, ω_b / P_1 : 기본 속도이다.

그리고 기본 속도에서의 효율은 식(9)와 같다.

$$\eta_b = \frac{P_e}{P_e + P_{\omega} + P_{iron} + P_{mac}} \quad (9)$$

여기서, P_e : 최고속도에서의 전력, P_{ω} : 동손, P_{iron} : 철손, P_{mac} : 기계손이다.

2.4 설계 모델 및 특성 해석

본 논문에서의 설계모델은 그림 1과 같다. 그림 1의 상세도 A에서 검게 칠해진 부분은 축방향으로 성층된 철심이며, 나머지 부분은 자속의 흐름을 각각의 극으로 집중시켜주는 역할을 하는 flux barrier를 나타낸다. 이 flux barrier의 폭은 성층된 철심의 포화자속밀도를 고려하여 적절히 결정해야 한다.

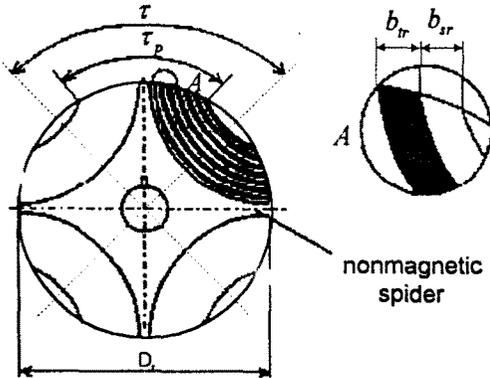


그림 1. 4극을 가지는 SynRM

그림 2는 고정자 슬롯 형상이며, 그림 3은 기본 속도 1,200[rpm]에서의 벡터도를 나타내고 있다.

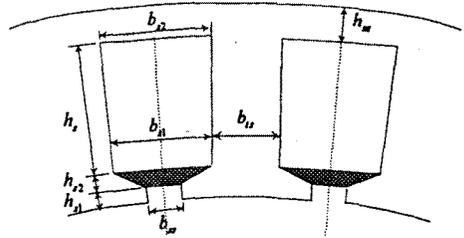


그림 2. 고정자 슬롯 형상

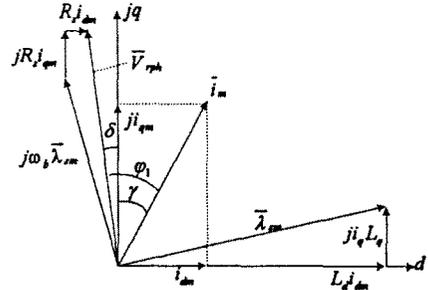


그림 3. 기본 속도에서의 벡터도

그림 4는 기본 특성식을 바탕으로 해석한 공극의 크기에 따른 인덕턴스변화를 나타낸 곡선이다. 직축 및 횡축 인덕턴스는 그림 4에서 보는 바와 같이 공극의 길이에 반비례한다. 발생토크 및 출력은 인덕턴스에 비례하므로 공극의 길이를 최대한 작게 결정해야 하지만, 이때 제작상의 문제도 고려해 주어야 한다.

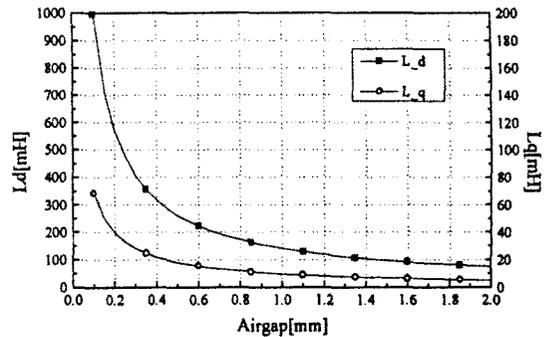


그림 4. 공극에 따른 인덕턴스 특성

그림 5는 적층길이/극피치 비에 따른 토크 특성을 나타낸 것이다. 적층길이/극피치 비가 증가하면서 발생하는 토크는 다소 감소됨을 볼 수 있다. SynRM이 저속인 경우에는 이 비율이 작아도 되지만, 고속으로 회전하는 경우에는 발생토크가 다소 감소되더라도 기계적인 안정성을 위해서 이 비율을 크게 할 필요가 있다. 그림 6은 입력 전류에 따른 발생토크의 특성곡선이다.

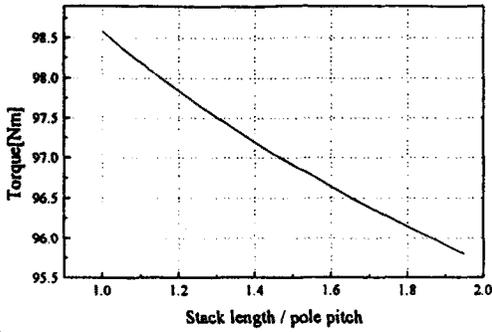


그림 5. stack 길이/극피치 비에 따른 토크 특성

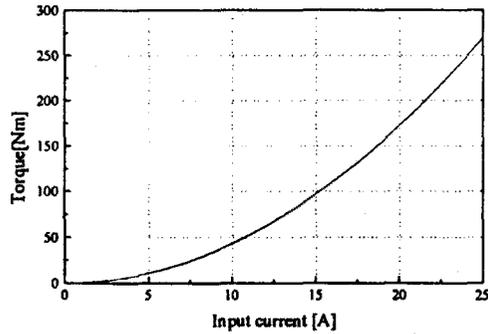


그림 6. 입력 전류에 따른 발생토크 특성

2.5 SynRM의 설계 사양 및 설계

표 1의 사양을 갖는 SynRM에 대해서 그림 7을 수행한 결과를 표 2에 나타내었다.

표. 1 설계 사양

기호	파라미터	값 [단위]
w_b	기본속도	1200 [rpm]
w_{rmax}	최고속도	2400 [rpm]
V_0	DC 입력 전압	800 [V]
P_1	Pole pairs 수	2
T_{em}	기본속도에 이르는 토크	100 [Nm]

표. 2 설계 결과

기호	항목	값	단위
B_{lgmax}	최대 공극자속밀도	0.74	[T]
τ	극 피치	134	[mm]
D_r	회전자 직경	170	[mm]
L	축방향 길이	160	[mm]
g	공극길이	0.45	[mm]
b_{sr}	차폐층 폭	2.1	[mm]
b_{lr}	요크 성층 폭	3.5	[mm]
r_s	슬롯 피치	14.8	[mm]

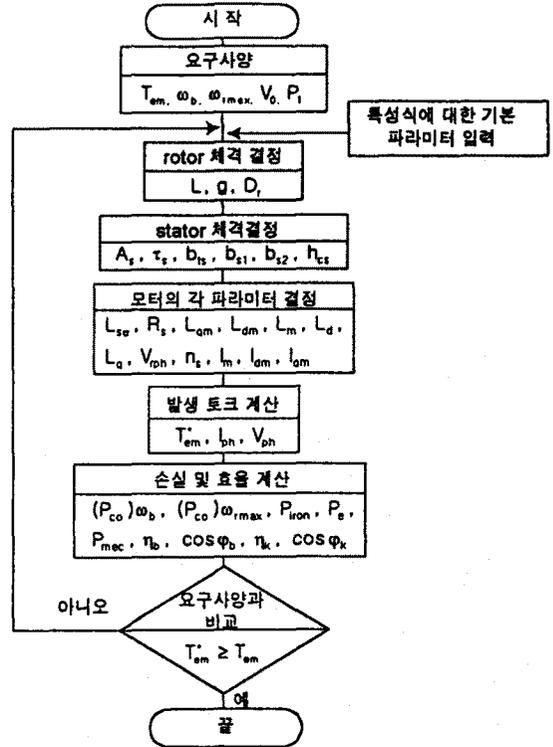


그림 7. SynRM의 설계 순서도

3. 결 론

SynRM의 고정자는 유도전동기와 같은 형태를 가지므로 매우 정현적인 회전자자력을 발생시킴으로써 소음이나 토크 리플등의 단점을 개선시키는 장점이 있다. 본 논문에서는 multiple flux barrier를 갖는 동기형 릴럭턴스 모터를 채택하여, SynRM의 설계과정 확립하였으며 이를 바탕으로 1,200[rpm]의 기본속도를 갖는 SynRM의 체적 및 전기회로 설계를 수행하고 그 특성을 해석하였다. 본 결과를 바탕으로 향후 고속용 SynRM의 상세설계, 특성 해석 및 제작을 위한 연구를 하고자 한다.

[참 고 문 헌]

- [1] Synchronous Reluctance Motors and Drives A New Alternative, IEEE IAS 29th Annual Meeting, 1994, pp.1-7
- [1] I. Boldea, "Reluctance Synchronous Machine and Drives", CLARENDON PRESS · OXFORD, 1996
- [2] M.J. Kamper, A.F. Volschenk, "Effect of rotor dimensions and cross magnetisation on L_d and L_q inductances of reluctance synchronous machine with cageless flux barrier rotor", IEE Proc.-Electr. Power Appl., Vol. 141, No. 4, July 1994