

고속 동기형 릴럭턴스 전동기의 회전자 설계 및 특성 해석

장석명, 문정술, 서진호, 성세진
충남대학교 전기공학과

Rotor Design and Characteristics Analysis of High Speed Reluctance Synchronous Motor

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

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

1. 서 론

동기형 릴럭턴스 모터(Reluctance Synchronous Motor: 이하 RSM)의 개념은 1830년대부터 나왔지만 저역률, 기동 등의 문제 때문에 그 실용성이 무시되었다. 최근 설계법과 재료의 향상으로 인해 역률은 점차 개선되어 왔으며 체적당 발생토크는 유도전동기보다 더 우수한 특성을 나타내고 있다. 외국의 참고문헌에 의하면 체적당 발생토크는 RSM이 최적설계가 이루어지고 특성이 우수한 재료로 제작이 되었을 경우 유도전동기보다 약 평균 20%의 토크를 더 발생시키는 것으로 나타났다. RSM은 타전동기에 비해 고가의 재료가 필요 없고 구조가 간단하여 가변 속도 분야에서는 직류 브러시리스 전동기나 유도전동기를 대체할 수 있을 것으로 전망된다. 그런데 RSM의 회전수가 수 만 rpm 이상으로 회전하기 위해서는 수백Hz 이상의 주파수가 입력이 되어야 하므로 주파수와 자속밀도, 적층 규소강판의 두께의 제곱에 비례하는 와류손실과 주파수에 비례하는 히스테리시스손이 매우 커진다. 따라서 히스테리시스손과 와류손을 포함하는 철손을 줄이기 위해서는 적층두께를 감소시켜야 하지만 이는 가공비의 증가는 물론 개개 적층강판의 기계적인 강도, 적층 점적율의 감소 등에서 한계가 있게 된다.

본 논문에서는 최고속도 24000[rpm], 최대출력 12[kW]를 갖는 고속형 RSM의 설계하였으며, 그 특성을 해석하였다.

2. 동기형 릴럭턴스 모터의 설계

2.1 RSM의 개요

RSM은 전자기적 에너지를 회전자에서 릴럭턴스 토크로 변환시킬 수 있도록 구성된 전기기기이다. RSM의

고정자는 유도전동기와 유사하지만, 회전자는 돌극의 형태를 가지게 되는데 그림 1과 같이 돌극형, 플럭스 배리어형, 축방향 성층형 등 여러 가지가 있다. 그림 1(a)의 돌극형은 구조가 간단한 반면 직축·횡축 인덕턴스비가 작고, 그림 1(b)는 회전자 축을 위한 공간을 만들어 주어야 하기 때문에 고속 운전시에는 구조적으로 약하게 된다. 그리고, 그림 1(c)는 직축·횡축 인덕턴스비가 매우 크지만, 제작이 용이하지 않으며 정확한 설계가 어렵다는 단점이 있다.

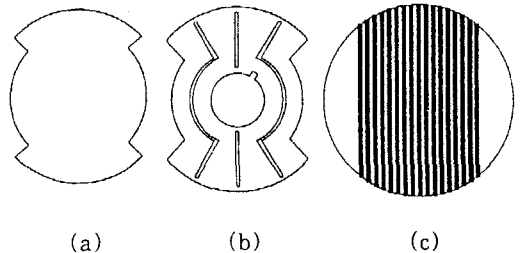


그림 1. RSM의 여러 가지 회전자 형상
(a)돌극형; (b)플럭스 배리어형; (c)축방향성층형;

2.2 RSM의 설계

RSM이 고속으로 회전하기 위해서는 토크가 매우 크게 필요하게 되며, RSM에서의 토크는 L_d/L_q 비에 크게 영향을 받게 된다. 따라서 본 논문에서는 요구사양으로부터 L_d/L_q 비를 결정한 후 회전자 설계시 이를 고려하였으며, 고정자는 동기전동기나 유도전동기와 같은 것으로 설계하였다.

즉 RSM의 고정자 권선은 정현적으로 분포되기 때문에 RSM의 토크 특성방정식은 일반적인 동기 전동기의 특성방정식으로부터 다음과 같이 유도할 수 있다.

$$T_{em} = \frac{3}{2} P_1 (L_d - L_q) I_{dm} I_{qm}; I_{dm} / I_{qm} = \sqrt{L_q / L_d} \quad (1)$$

여기서, P_1 : 극쌍, L_d : 직축인덕턴스, L_q : 횡축자화 인덕턴스, I_{dm} : 직축자화전류, I_{qm} : 횡축자화전류.

그림 2는 RSM의 설계흐름도를 나타낸 것으로서, 본 논문에서는 설계 요구사양으로부터 필요한 L_d/L_q 를 계

산하였으며, 회전자의 형상에 따라서 그 값을 구하고, 유한요소해석을 통하여 직축·횡축 자속분포 및 인덕턴스 값을 구하여 설계의 타당성을 확인하였다.

표. 1 설계 파라미터

항목	값
DC 입력 전압	300 [V]
극수	2
최대토크	40 [Nm]
공극길이	0.5[mm]
최대 공극자속밀도	0.60[T]
고정자 외경	203[mm]
고정자 내경	106[mm]
회전자 외경	105[mm]
회전자 축방향 길이	103[mm]
상수	3상
상당 턴수	20
최고속도	24000 [rpm]
최대 출력	12[kW]
L_d/L_q 비	10~12

3. 회전자의 설계 및 검토

3.1 RSM의 회전자 특성

RSM의 고정자는 유도 전동기와 실제적으로 같기 때문에, 회전자 구조에 따른 특성해석이 매우 중요하다. 고속용 회전자의 구조는 L_d/L_q 비가 커야 하며, 고속회전시 발생하는 기계적 스트레스를 견딜수 있도록 가능한 간단한 구조가 되어야 한다. 그림 1(c)의 축방향 성층형인 경우, L_d/L_q 가 약 20으로 매우 큰 값을 가지지만 고속 회전시의 여러 가지 문제들을 고려하여 설계하기가 매우 어려운 실정이다. 그림 3은 Hofmann이 제안한 바 있는 회전자 형상을 나타낸 것으로서, L_d/L_q 가 비교적 크며, 매우 간단한 구조를 가진다는 등의 장점이 있다. 본 논문에서는 고속용 RSM 회전자 형상으로 그림 3의 모델을 채택하였으며 그 특성을 해석하였다. 그림 3에서 검게 칠해진 부분은 축방향으로 성층된 철심이며, 나머지 부분은 자속의 흐름을 각각의 극으로 집중시켜주는 역할을 하는 절연체를 나타낸다. 이 절연체의 폭은 포화자속밀도를 고려하여 적절히 결정해야 한다.

3.2 인덕턴스 계산

직축·횡축 인덕턴스는 식(2)와 같다.

$$L_d = \frac{3}{2} L_{dm} + L_l \quad (2)$$

$$L_q = \frac{3}{2} (L_{qm} + L_{qmc}) + L_l$$

여기서, L_{dm} : 상당 직축 자화 인덕턴스, L_l : 상당 누설 인덕턴스, L_{qm} : 횡축자화인덕턴스, L_{qmc} : 순환자

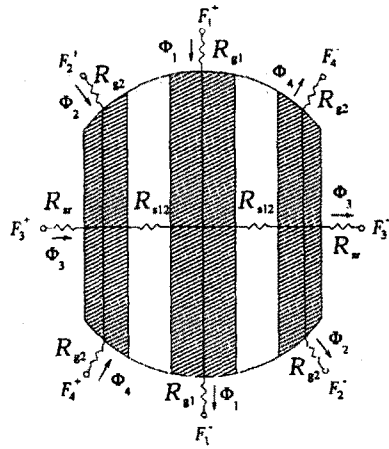


그림 3. RSM의 2극용 회전자 설계모델

화인덕턴스.

그림 3에서의 기자력 \mathcal{F}_i 와 기자력에 의한 공극자속 ϕ_i 은 식(3)의 관계에 있다.

$$[\mathcal{F}] = [R][\phi] \quad (3)$$

자기저항의 각 행렬원소는 식(4)로 정의되며, 따라서 상당 직축자화인덕턴스 및 횡축자화인덕턴스는 식(5)에 의해서 구해진다.

$$R_{ij} = \frac{\mathcal{F}_i}{\phi_j} \quad | \quad \phi_i = 0, i \neq j \quad (4)$$

$$L_{\phi m} = \frac{[\mathcal{F}]^{-1}[R][\mathcal{F}]}{I^2} \quad (5)$$

또한, 순환 자화인덕턴스는 식(6),식(7)과 같다.

$$L_{qmc} = \sum_i L_{qmci} \quad (6)$$

$$L_{qmci} = \frac{\mu_0 d l_s N^2}{8g} (\sin(2\alpha_{2i}) - \sin(2\alpha_{1i}) - 2(\alpha_{2i} - \alpha_{1i}) + 4(\cos(\alpha_{2i}) - \cos(\alpha_{1i}))^2 / (\alpha_{2i} - \alpha_{1i})) \quad (7)$$

여기서, α_{1i}, α_{2i} : i 번째 자성체의 중점에서부터의 각. (그림 4참조)

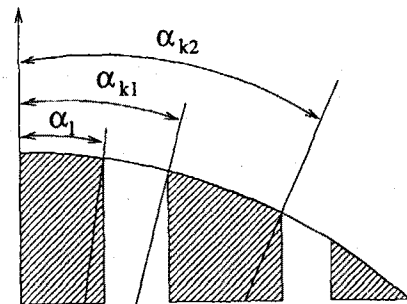


그림 4. i 번째 자성체의 파라미터

3.3 회전자 설계 결과

본 논문에서는 자성체의 세그먼트를 5개, 회전자의 극스팬은 120도의 조건하에서 (비자성체폭/자성체폭)에

따른 인덕턴스를 계산하여 그림 5에 나타내었다. 그림 5로부터 폭의 비가 약 0.6일 때 L_d/L_q 값이 약 12로 가장 크게 나타났음을 확인하였다.

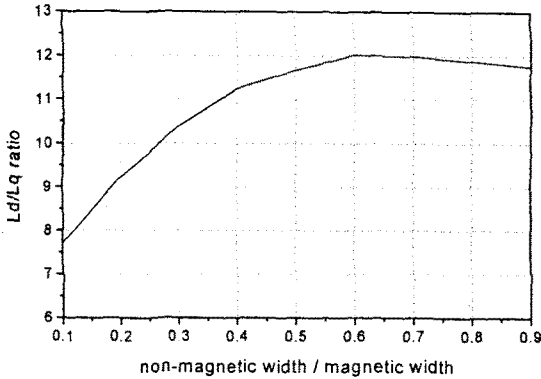


그림 5. 비자성체/자성체 폭에 따른 L_d/L_q 특성

그림 5에서 결정된 비자성체/자성체 폭을 0.6으로 하였을 때의 직축·횡축 인덕턴스 및 2차원 유한요소해석에 의한 인덕턴스값을 표 2에 비교하였다.

	특성식	FEM
직축인덕턴스	4.55mH	4.08mH
횡축인덕턴스	0.39mH	0.33mH
L_d/L_q	11.7	12.4

그림 6은 직축자화에 의한 자속 분포도를 나타낸 것이며 그림 7은 횡축자화에 의한 자속 분포도를 나타낸 것이다. 직축 자화시에는 자속의 방향이 두 극의 방향과 일치하기 때문에 자속흐름이 잘 이루어지지만 횡축 자화시는 회전자에 적용되어 있는 절연체로 인한 자기저항 증가 때문에 자속이 적게 분포하게 된다.

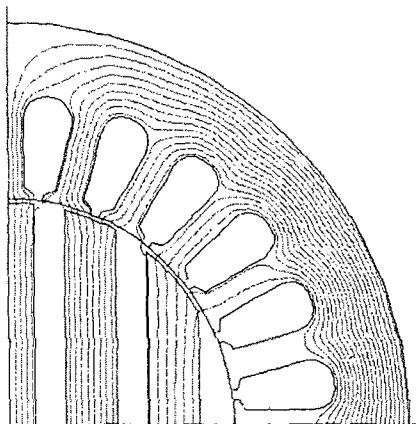


그림 6. 직축 자화에 의한 자속분포

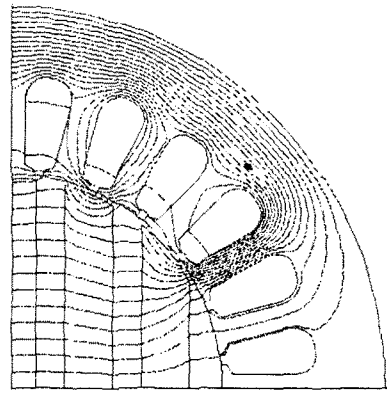


그림 7. 횡축자화에 의한 자속분포

5. 결론

RSM은 전자기적 에너지를 회전자에서 릴럭턴스 토크로 변환시킬 수 있도록 구성된 전자기기로서 고정자 권선에 인가되는 전류나 전압을 회전자의 위치에 따라 적절히 스위칭 함으로써 가변속 구동이 가능하다. 또한 고정자는 유도전동기와 같은 구조로 권선이 감겨져 있기 때문에 발생하는 기자력은 매우 정현적이다. 따라서 SRM의 단점이었던 소음이나 토크 리플 등을 크게 개선시킬 수 있는 장점이 있다. 그리고 구조적으로 매우 간단하기 때문에 고속으로 회전하는 경우에도 기계적인 안정성만 확보된다면 우수한 특성을 나타내므로 그 활용범위는 매우 확대될 것으로 전망된다.

본 논문에서는 새로운 형태의 회전자를 갖는 2400rpm급 RSM을 설계하였다. 즉, 회전자 2극이 되도록 회전자 자성체부분과 비자성체 부분의 비율에 따른 L_d/L_q 비를 구하였고, 또한 유한 요소해석을 통하여 인덕턴스를 계산하여 설계의 타당성을 검토하였다.

본 연구는 기초전력공학 공동연구소의 연구과제 95-지-04의 연구비 지원에 의하여 수행된 연구결과입니다.

(참고 문헌)

- [1] H.Hofmann,S.R. Sanders,"Synchronous Reluctance Motor/Alternator for Flywheel Energy Storage Systems". In IEEE Workshop on Power Electronics in Transportation, October 24-25, 1996, Dearborn, Mich.pp. 199-206
- [2] Synchronous Reluctance Motors and Drives A New Alternative, IEEE IAS 29th Annual Meeting, 1994, pp.1-7
- [3] I. Boldea, "Reluctance Synchronous Machine and Drives", CLARENDON PRESS · OXFORD, 1996
- [4] A. Vagati et al, "Design Criteria of High Performance Synchronous Reluctance Motors", 1992
- [5] A. Fratta-A. Vagati, "Synchronous Reluctance vs Induction Motor: a comparison", Proceedings, Intelligent Motion, April, 1992