

1kW급 리럭턴스 동기 전동기의 특성해석

최경호*, 김남훈*, 백원식*, 김동희*, 황도하**, 김민희***
 영남대학교*, 한국전기연구원**, 영남이공대학**

A characteristic analysis of the 1kW Reluctance Synchronous Motor

Kyeong-Ho Choi*, Nam-Hun Kim*, Won-sik Baik*, Dong-Hee Kim*, Don-Ha Hwang**, Min-Huei Kim***
 *Yeungnam University, **KERI, ***Yeungnam College of Science & Technology

Abstract - This paper presents detailed characteristic of a Reluctance Synchronous Motor(RSM) which has a transverse-laminated rotor. First of all, the analysis of a magnetic circuit field between stator and rotor should be achieved in order to predict the performance characteristic of the RSM. For the analysis of a magnetic circuit field, the Finite Element(FE) analysis and a experimental method are used. The analytical result of the inductance flux distribution, vector potential, and the output shows some good characteristic along with the load condition.

key words: Flux barrier, transverse-laminated rotor

1. 서 론

동기형 리럭턴스 전동기(RSM: Reluctance Synchronous Motor)는 최근 펌프, 고효율 팬, 엘리베이터, 경량의 차량 등에 유도전동기나 스위치드 리럭턴스 전동기의 대체 전동기로서 제안되고 있다[1]. 최근에는 새로운 설계 기법을 이용하여 기존의 단점으로 나타난 저역 및 낮은 토크밀도 등도 상당히 개선되었으며, 특히 새로운 설계기법 중에서 회전자 코어가 축방향으로 적층된 전동기가 개발되면서 이러한 단점들을 한층 더 줄이는 방향으로 연구되고 있다. 또한, RSM은 회전자 형상에 따라 유도기에 비해 저렴하게 생산이 가능하며, 또한 회전자의 손실이 발생되지 않아 보다 효율적이라고 할 수 있고, 스위치드 리럭턴스 전동기에 비해서는 토크 리플적인 면에서 장점을 가지고 있다고 할 수 있다.

RSM의 고정자는 기존의 동기전동기 또는 유도전동기와 동일하며, 회전자는 돌극(Saliency)을 갖는 구조로 되어 있다. 돌극비를 크게 하기 위한 대표적인 두가지의 회전자 구조는 전위장벽형과 축방향 성층형이 있는데, 새그먼트형은 기존의 유도전동기와 유사한 공정으로 제작이 가능하나 축방향 성층형 보다 일반적으로 돌극비가 낮은 것이 단점이다. 그러나 축방향 성층형은 새그먼트형과 같은 리브가 존재하지 않아 돌극비를 크게 할 수 있다. 그러나, 제작상 개개의 철판을 절곡하고 그 사이 절연물을 삽입한 후 철판을 적층하여 볼트로 회전자에 고정하게 된다. 따라서, 제작의 공정이 많아지고 또한 고속 회전시 볼트가 풀리는 현상이 나타날 수 있다.

발생토크의 원리는 고정자의 권선에 전류가 인가됨으로써 자계가 형성될 때, 회전자의 리럭턴스가 최소가 되도록 정렬하려는 특성을 이용하였다. 리럭턴스 토크는 돌극비에 비례하므로 전동기의 설계 측면에서 돌극비를 최대화하려는 연구가 이루어지고 있다[2].

본 연구에서는 산업용을 목적으로 제작된 멀티 전위장벽형 리럭턴스 전동기의 파라미터의 변화에 따른 전동기의 특성 변화를 연구하였다. 우선 정확한 파라미터의 특성을 알기 위하여 FEM해석과 실험을 통하여 인덕턴스 및 쇄교자속을 계산하거나 측정하여 그 값들의 유사

성을 확인하였으며, 또한 구해진 파라미터의 값을 이용하여 전동기의 구동에 적용하여 전동기의 운전특성을 검토하였다.

2. RSM의 모델링 및 해석

2.1 RSM 모델

그림 1은 연구 및 실험용으로 제작된 RSM의 형상으로서 회전자의 코어가 전위장벽형으로 적층된 1kW급 2400[rpm]의 정격을 가지는 전동기의 구조이며, 표 1은 제작된 전동기의 제원이다. RSM의 고정자 구조는 유도전동기와 유사한 형태이며, 회전자는 구조에 따라 분절형(segmental)과 자속장벽형(Flux barrier) 및 축이방향적층형(Axially laminated anisotropic, ALA)으로 크게 구분된다[2]. 본 연구에 적용된 전동기의 회전자는 자속장벽형으로 제작된 것을 사용하였다. 이 전동기의 장점은 공급되는 전압의 주파수에 따라 동기속도로 회전하며, 회전자에 전류가 흐르지 않기 때문에 회전자 손실이 적으며, 기동을 목적으로 회전자에 도체나 권선이 요구되지 않는다는 점이다. 일반적으로 리럭턴스 동기전동기의 고정자는 3상 대칭 정현파 분포 권선법이 채용되고 있으며, 회전자는 유도전동기의 형태로 비동기로 기동되어 정상상태에서는 오픈루프모로 동기화 된 속도로 운전되는 특성을 가진다. 이 전동기는 저가의 가격으로 쉬운 동기화 속도를 얻는데 비해서, 회전자 설계시 제한된 Ld/Lq 비에 의하여 역률과 출력토크가 낮은 단점을 가진다. 그러나 새그먼트형인 경우 punched sheets의 lamination은 적용상 단순하지 않은 형상이 요구되더라도 제작 공정이 간편하고 대량생산에 적합하다.

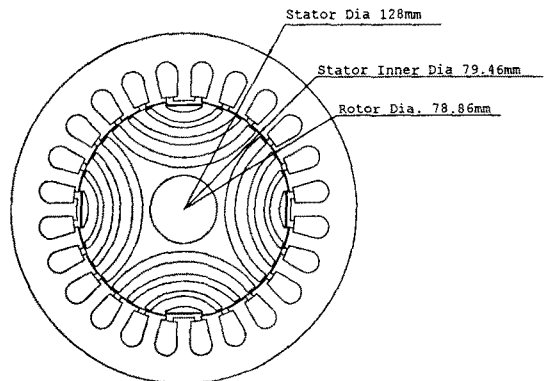


그림 1. 새그먼트구조의 리럭턴스 동기전동기
 Fig. 1. Synchronous reluctance motor with segmented rotor

표 1. 전동기의 제원
Table 1. Specification of RSM

출 력	1[Kw]
정격속도	2400[rpm]
극 수	4
정격전압	127[V]
결 선	2병렬 Y결선
상 저항	1.0 Ω
정격토크	2 [Nm]

2.2 전압 및 토크 방정식

그림 2는 리럭턴스 동기전동기의 d-q 모델의 등가회로이다. R_m 에서 발생하는 철손과 자기포화를 무시하면, 리럭턴스 동기전동기의 전압방정식과 운동방정식은 회전자 동기좌표계의 d-q 모델로 다음의 (1)과 (2)식으로 표시되며, 두 식은 각각 동손, 자계에너지변화, 기계적 출력항으로 나타내었다. 토크는 식(3)으로 유도된다. 또한 자속은 식(4)로 표시되며, 역율은 식(5)으로 된다. 여기서 Φ_{ds} 와 Φ_{qs} 는 d축 및 q축의 고정자 자속, J 는 관성모멘트, T_L 은 부하토크, B 는 마찰계수, L_{ls} , L_{md} 와 L_{mq} 는 고정자 누설자속과 d축 및 q축의 자기 인덕턴스이며, R_s 는 상당 고정자 저항이다.

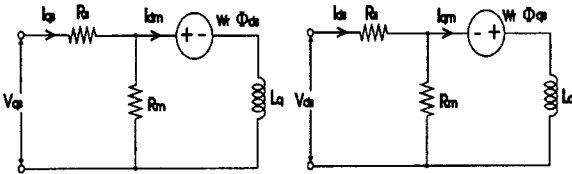


그림 2. RSM의 등가회로
Fig. 2. Equivalent circuit of a RSM

$$V_{ds} = R_s I_{ds} + \frac{d \Phi_{ds}}{dt} - \omega_r \Phi_{qs} \quad (1)$$

$$V_{qs} = R_s I_{qs} + \frac{d \Phi_{qs}}{dt} + \omega_r \Phi_{ds} \quad (2)$$

$$\frac{d \omega_r}{dt} = \frac{1}{J} (T_e - T_L - B \omega_r) \quad (3)$$

$$T_e = \left(\frac{3}{2}\right) \left(\frac{P}{2}\right) (\Phi_{ds} I_{qs} - \Phi_{qs} I_{ds}) \quad (4)$$

$$\Phi_{ds} = L_{ls} I_{ds} + L_{md} I_{ds} = L_d I_{ds} \quad (5)$$

$$\Phi_{qs} = L_{ls} I_{qs} + L_{mq} I_{qs} = L_q I_{qs} \quad (6)$$

$$\cos \phi = \cos(\delta + \pi/2 - \gamma) \quad (7)$$

토크를 다시 쓰면

$$T_e = \left(\frac{3}{2}\right) \left(\frac{P}{2}\right) L_d \left(1 - \frac{L_q}{L_d}\right) I_{qs} I_{ds} \quad (8)$$

토크는 고정자 전류벡터 I_s 의 크기와 두 인덕턴스의 차에 의해서 결정됨을 알 수 있다. 식(8)에서는 돌극비(L_d/L_q)가 토크의 중요한 요소임을 알 수 있다.

2.3 $k = L_d/L_q$ 계산 및 측정

RSM은 식(8)에서와 같이 L_d/L_q 의 변화에 의해 토크특성이 결정됨으로 실험용 전동기의 L 값을 측정하였다.

다. 측정은 상용주파수에서 AC전압을 인가하여 식(7)에 의하여 계산한다[2]. 전류를 변화시켰을 때 회전자를 이동시키면서 측정하였다.

$$L = \frac{1}{2\pi f} \sqrt{\left(\frac{V_{ac}}{I_{ac}}\right)^2 - R^2} \quad (9)$$

여기서, f 는 주파수, V_{ac} 와 I_{ac} 는 입력전압 및 전류, R 는 권선저항이다.

그림 3은 전류에 따른 L_d 와 L_q 의 측정값을 보여주고 있다. 그림 4는 단위전류당 최대 토크를 낼 때의 전류에 따른 L_d/L_q 의 비를 나타낸 것으로 전류에 따라 2.6에서 4.2까지의 변화가 나타남을 알 수 있다.

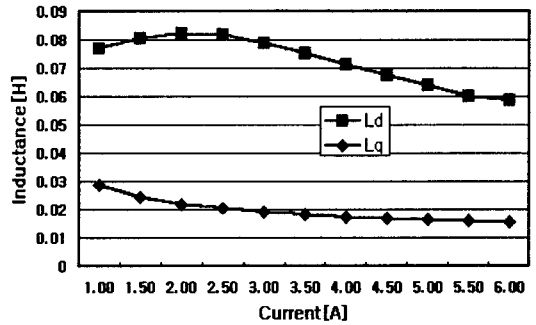


그림 3. 측정된 L_d 와 L_q 값
Fig. 3. Measured L_d and L_q

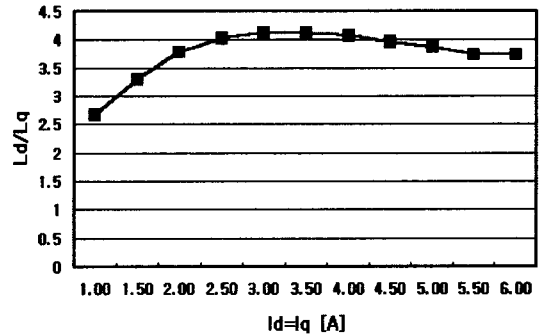


그림 4. 전류에 따른 L_d/L_q 비
Fig. 4. L_d/L_q ratio with current

2.4 FEM 해석

RSM의 회전자와 고정자의 자속왜곡 특성을 알아보기 위하여 유한요소해석을 수행하였다. 사용된 프로그램은 상용프로그램인 Flux-2D를 사용하였다.

동기형 리럭턴스 전동기의 설계에서 고정자의 슬롯에 의한 공극 자속의 고조파가 존재하므로, 회전자의 설계에서 이를 고려해야만 한다. 세그먼트형의 경우 세그먼트의 개수를 슬롯의 정수배로 함으로써 슬롯 고조파에 의한 토크 맥동을 최소화 할 수 있다.

그림 5에서 8까지는 d축에서 각각 자속 특성 및 고조파 분포를 그림 9에서 12까지는 q축에서 해석된 특성을 보여준다.

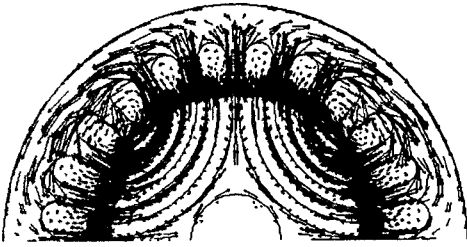


그림 5. d축 여자
Fig. 5. d-axis excitation

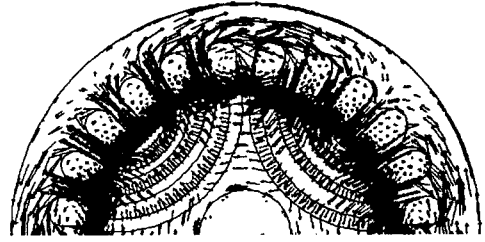


그림 9. q축 여자
Fig. 9. q-axis excitation

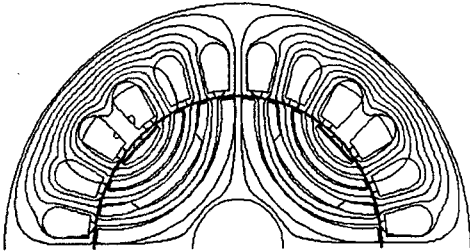


그림 6. d축 등가 자속 line
Fig. 6. d-axis equ-flux line

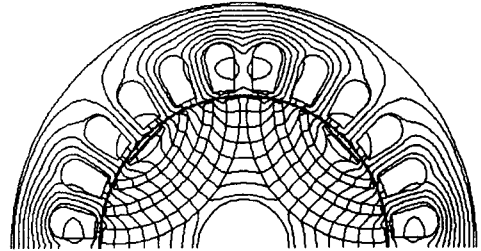


그림 10. q축 등가 자속 line
Fig. 10. q-axis equ-flux line

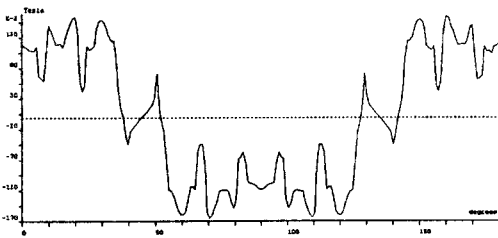


그림 7. d축 공극에서 자속밀도
Fig. 7. d-axis flux density distribution at the air gap

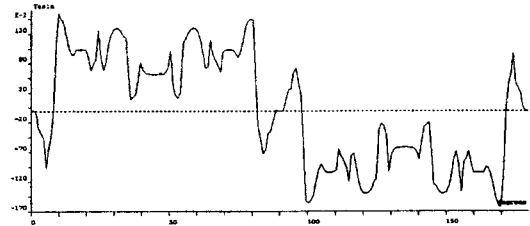


그림 11. q축 공극에서 자속밀도
Fig. 11. q-axis flux density distribution at the air gap

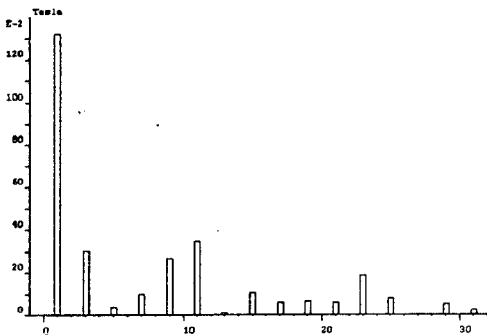


그림 8. d축 공극자속밀도의 고조파 분포
Fig. 8. Harmonic components of d-axis flux density distribution

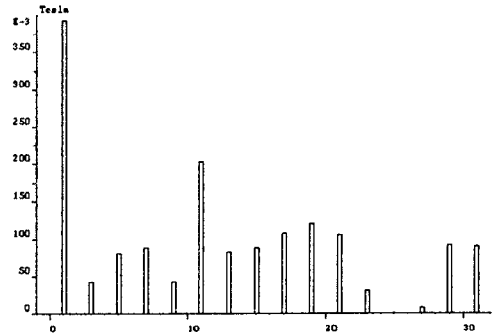


그림 12. q축 공극자속밀도의 고조파 분포
Fig. 12. Harmonic components of q-axis flux density distribution



그림 13. RSM 회전자와 고정자
Fig. 13. Rotor and stator of RSM

3. 실험결과 및 검토

3.1 전체 시스템 구성도

그림8은 동 특성을 알기 위한 제어 시스템의 블록다이어그램을 나타내고 있다. 직접 고정자 자속과 토크제어에 의한 고성능 리럭턴스 동기전동기의 제어 시스템을 디지털제어로 그림과 같이 구성하였다. 속도제어는 PI 제어기를 사용하였으며, 토크 및 고정자 자속 추정은 전동기 단자에서 측정된 전압전류를 사용한 전압전류모델 관측기를 이용하였으며, 자속은 2레벨로, 토크는 3레벨의 히스테리시스 밴드 제어를 사용하였다. 디지털 제어를 위한 제어기는 TI사의 TMS320C31 DSP를 사용하였다[7][8].

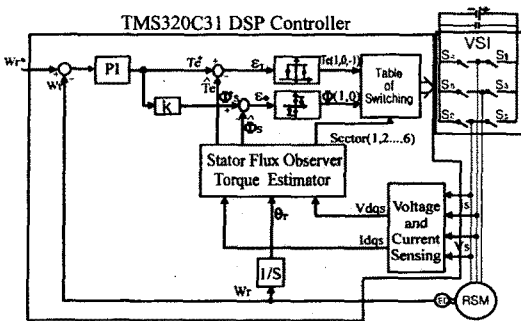


그림 13. RSM 제어시스템
Fig. 13. Control system of RSM

3.2 실험 및 결과

실험은 본 논문에서 자체 해석이나 실험을 통하여 구해진 L_d 와 L_q 의 값을 각각의 속도와 부하에 따라 적용하여 전동기의 성능실험을 수행하였다. 전동기의 출력측정을 위한 다이내모미터는 Leroy somer 사의 50(Nm), 3000(rpm) 정격의 FP. 15/30을 사용하였으며, Power analyzer는 Voltech사의 PM3000을 사용하여 측정하였다. 그림은 1000, 1500(rpm)에서 출력과 효율을 나타낸 곡선으로 1500(rpm)에서는 최대 효율까지 나타남을 알 수 있었다. 실험을 통해서 축 방향으로 적층된 RSM의 경우 d-q축의 리럭턴스 비는 단위전류당 최대 토크를 발생할때의 $k = L_d/L_q = 2.57 \sim 4.2$ 로 비교적 낮지만 1000(rpm)의 이상의 영역에서는 우수한 특성이 얻어짐을 알 수 있었으며 또한 속도제어에서 빠른 응답특성과 정밀한 제어특성이 얻어짐이 확인되었다.

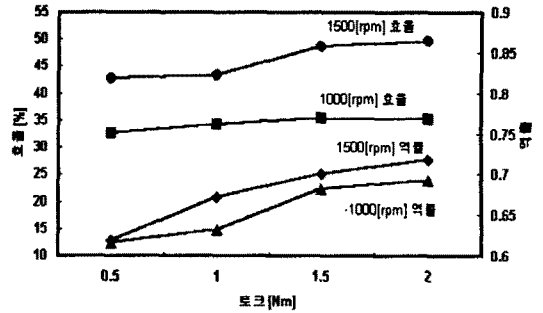


그림 14. 1000, 1500(rpm)에서 효율, 역률
Fig. 14. Efficiency and powerfactor at 1000, 1500(rpm)

4. 결론

동기형 리럭턴스 전동기는 최근 펌프, 고효율 팬, 엘리베이터, 경량의 차량 등에 기존의 전동기인 유도기에 비해 저렴하게 생산 가능하며, 또한 회전자 손실이 발생되지 않아 보다 효율적이라고 할 수 있고, 또한 스위치드 리럭턴스 전동기에 비해서는 토크리플이 적다면에서 장점을 가지고 있어서 대체 전동기로서 많은 관심의 대상이 되고 있다. 특히 최근에는 새로운 설계 기법을 이용하여 기존의 단점으로 나타난, 저 역률, 저 토크밀도 등도 상당히 개선되어졌다.

본 연구에서는 산업응용에 적용될 수 있는 리럭턴스 전동기의 설계에서 최종 동작 특성까지의 전반적인 전동기의 특성을 살펴보았다. 방법적으로는 유한 요소법을 이용하여 전동기 토크특성을 알 수 있는 L_d, L_q 값을 구하였으며, 고정자와 회전자의 쇠교자속의 변화로 구조설계를 하여 최종적으로 실험을 통하여 전동기의 운전특성을 검토하였다. 검토결과 저속영역과 고속영역에서도 우수한 운전 특성이 얻어짐을 확인하였다. 향후 고성능, 고기능의 제어용 전동기로서 충분히 유용하게 사용될 수 있으리라 기대된다.

(참고 문헌)

- [1] T.A.Lipo, "Synchronous reluctance machines-A viable alternative for ac drives?," Elec. Mach. Power Syst., vol. 19, pp. 659-671, Nov./Dec. 1991.
- [2] Performance of PM-Assisted Synchronous Reluctance Motor for High-Efficiency and Wide Constant-Power Operation", IEEE, Tran. on industry application, vol. 37, no.5, pp. 1234-1237, sep/oct 2001.
- [3] Ion Boldea, Reluctance Synchronous Machines and Drives, Oxford Science, 1996.
- [4] 김민회, 김남훈, 김민호, "직접 토크 및 자속 제어에 의한 유도 전동기의 위치제어 시스템," 대한전기학회 논문집, 제 49P권, 제2호, pp.22-28, Oct., 2000.
- [5] Ion Boldea, Reluctance Synchronous Machines and Drives, Oxford Science, 1996.
- [6] Rolf Lagerquist, Ion Boldea, and T. J. E. Miller, "Sensorless Control of the Synchronous Reluctance Motor," IEEE Trans. on I.A., Vol. 30, No. 3, pp. 673-682, May, 1994.
- [7] 김민회, 김남훈, 백원식, "직접토크제어에 의한 위치검출기 없는 리럭턴스 동기전동기의 고성능 제어시스템," 전력전자학회 논문집, 제 7권, 제1호, pp.81-90, Feb., 2002.
- [8] 김민회, 김남훈, 최경호, "직접토크제어에 의한 리럭턴스 동기 전동기의 고성능 위치제어 시스템," 대한전기학회 논문집, 제 51B권, 제3호, pp.150-157, March, 2002.