

断片形 회전자 구조 동기형 릴럭턴스 모터와 유도전동기의 비교에 관한 연구

손연호*, 이중호*, 김정철**, 이동명**, 윤상백*, 현동석*

*한양대학교 전기공학과, ** LG 전자 생활 시스템 연구소

A Study on the Comparison of Synchronous Reluctance Motor and Induction Motor

Yeon-Ho Son*, Jung-Ho Lee*, Jung-Chul Kim**, Dong-Myung Lee**, Sang-Baeck Yoon* and Dong-Seok Hyun*

*Dept. of Electrical Engineering, Hanyang University, ** LG Electronics Living System Lab.

Abstract - This paper represents comparisons between induction motor and synchronous reluctance motor(SynRM), on the basis of the obtainable torque-per-volume. The Synchronous Reluctance candidate has been individuated in a motor with segmented rotor; the rotor segments have been properly designed, to avoid rotor iron losses.

1. 서 론

동기형 릴럭턴스 모터는 구조적인 면에서 회전자권선이 없으므로 간단하고 고장이 적어 신뢰도가 높다. 일반 전동기의 취약점 중의 하나인 브러시와 정류자가 없기 때문에 크기가 작아지고 무게가 가벼워지며, 일정속도를 유지하기 위한 제어도 용이하다. 또한 유도전동기에 비해 회전자에 발생되는 손실이 거의 없기 때문에 장시간 운전이 필요하거나 기동과 정지가 빈번한 경우에 유리하며, 고정자에서만 열이 발생하여 전동기를 냉각시키기도 용이하다.

동기형 릴럭턴스 모터는 1960년대 이후 영국과 미국에서 많은 주목을 받기 시작하여 최근 30여년 동안 급속한 발전을 하여 왔다. P.J. Lawrenson은 이미 60년대에 断片形(segmental) 회전자의 해석적 방법으로서의 설계기법을 제안하였고 [1], 80년대 이후 영국의 T.J.E. Miller, El-Antably는 축방향 적층형 회전자 모터를 연구 발표 연구하고 있다 [2][3]. 또한 이탈리아의 A. Vagati는 토크 맥동과 철손을 최소화하는 다중 断片形 회전자를 최적 설계하였으며, 더욱이 영구자석을 내장한 형태도 제안하여 이미 많은 연구 성과를 거두었다 [4]-(6).

우리나라에서의 연구는 극히 미비하며, 기존의 여러 모터와의 특성비교를 통한 장단점 연구가 시급하다 할 것이다.

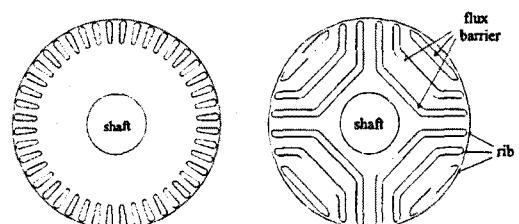
본 논문에서는 동기형 릴럭턴스 모터와 유도전동기의 실험에 의한 비교를 통하여 고정된 전력 소비

능력에 기초하여 동기형 릴럭턴스 모터와 유도전동기부터 얻을 수 있는 단위부피당 토크, 효율 등 여러 가지 특성을 비교하였다. 동기형 릴럭턴스 전동기의 회전자 구조는 Vagati가 제안한 断片形 구조인 4극 전동기이다. 유도전동기는 기존에 설계된 같은 출력의 전동기이다. 두 전동기 모두 같은 고정자를 사용하였다.

2. 유도전동기와 동기형 릴럭턴스 모터의 특성

본 논문의 동기형 릴럭턴스 모터는 Vagati에 의해 연구된 断片形 회전자를 사용하였다. 이러한 회전자는 몇 개의 자속 장벽(flux barrier)과 립(rib)을 가지고 있는 횡적 층 형태이다. 断片形 구조의 회전자는 축방향 적층형 회전자에서는 적용하기 어려운 사구(skew)를 줄 수 있고 구조가 간단하여 제작이 용이하므로 본 실험에 사용하였다.

유도기와 断片形 동기형 릴럭턴스 모터의 회전자 구조는 그림 1에 나타낸 바와 같다.



a) 유도전동기 b) 동기형 릴럭턴스 모터

그림 1 회전자 구조

3. 유도전동기와 동기형 릴럭턴스 모터의 수학적 모델

유도전동기에 대한 전압방정식 및 토크에 관한 식은 다음과 같다 (1)-(6).

$$\overline{V}_s = R_s \overline{i}_s + \frac{d \overline{\lambda}_s}{dt} + j \omega_0 \overline{\lambda}_s \quad (1)$$

$$0 = R_r \overline{i}_r + \frac{d \overline{\lambda}_r}{dt} + j(\omega_0 - \omega) \overline{\lambda}_r, \quad (2)$$

$$\overline{\lambda}_s = (L_s + L_m) \overline{i}_s + L_m \overline{i}_r, \quad (3)$$

$$\overline{\lambda}_r = L_m \overline{i}_s + (L_r + L_m) \overline{i}_r, \quad (4)$$

$$T_{im} = \frac{3}{2} P (\overline{\lambda}_s \times \overline{i}_s) \quad (5)$$

$$T_{im} = \frac{3}{2} P (\overline{\Psi}_s \times \overline{i}_s) \quad (6)$$

여기서 ω_0 는 기준축의 전기적 속도이고 ω 는 전기적 회전자 속도이다. 첨자 s는 고정자, r은 회전자를 의미한다. L_m 은 자화 인덕턴스이고 L_s 는 자기 인덕턴스이다.

식(3)으로부터 식(7)-(8)이 유도된다. 여기서 K_r 은 회전자 결합 계수 $L_m / (L_m + L_r)$ 이다. 그리고 토크식 (6)은 (9)식으로 변형된다. 마지막으로 식 (10)은 주울 손실이다.

$$\Psi_d = L_m i_{sd} \quad (7)$$

$$\Psi_q = K_r L_r i_{sq} \quad (8)$$

$$T_{im} = \frac{3}{2} P K_r L_m i_{sd} i_{sq} \quad (9)$$

$$= \frac{3}{2} P \left(1 - \frac{K_r L_r}{L_m}\right) L_m i_{sd} i_{sq} \quad (9)$$

$$P_j = 3R_s(i_{sd}^2 + i_{sq}^2) + 3R_r(K_r i_{sq})^2 \quad (10)$$

동기형 릴럭턴스 모터에서는 식 (7)-(10)과 유사하게 유도될 수 있다. (d,q) 기준축은 회전자와 동기적으로 회전한다. d축은 가장 높은 퍼미언스의 방향으로 잡는다.

$$\overline{V}_s = R \overline{i}_s + \frac{d \overline{\lambda}_s}{dt} + j \omega_0 \overline{\lambda}_s \quad (11)$$

$$\overline{\lambda}_s = \begin{vmatrix} L_d & 0 \\ 0 & L_q \end{vmatrix} \overline{i}_s \quad (12)$$

$$T_{SynRM} = \frac{3}{2} P (\overline{\lambda}_s \times \overline{i}_s) = \frac{3}{2} P (\overline{\Psi}_s \times \overline{i}_s) \quad (13)$$

회전자 전류의 不在를 제외하고는 유도 전동기와 같다. 유사한 방정식이 식(14)-(17)에 나타난다.

$$\Psi_d = L_{dm} i_a \quad (14)$$

$$\Psi_q = L_{qm} i_q \quad (15)$$

$$T_r = \frac{3}{2} P \left(1 - \frac{L_{qm}}{L_{dm}}\right) L_{dm} i_d i_q \quad (16)$$

$$= \frac{3}{2} P K_{dq} L_{dm} i_d i_q \quad (16)$$

$$P_j = 3R_s(i_d^2 + i_q^2) \quad (17)$$

식 (16)과 (9)를 비교해 보면 3개의 뚜렷한 요소가 토크에 영향을 준다는 것이 명백하다. 자화

인덕턴스 (L_m, L_{dm}), q,d 인덕턴스 비율 (L_{qm} / L_{dm}) 그리고 전류용량에 손실량에 영향을 끼친다.

일단 전력 소비량이 주어지고 철손이 주어지면, 동기형 릴럭턴스 모터의 전류용량은 회전자의 주울 손실이 없기 때문에 유도전동기보다 높다는 것은 명백하다.

4. 실험에 의한 제반특성

동기형 릴럭턴스 모터와 유도전동기의 여러 가지 특성을 비교하기 위해서 아래와 같은 실험을 수행하였다. 두 모터의 정격출력은 400W이고 벡터 제어 인버터 정격속도 1500 rpm에서 실험을 행하였다. 실험의 구성도는 그림 2와 같다.

본 본문에서의 실험은 정격의 약 80%의 부하를 인가하여 시행하였다. 여기서 두 모터의 부피가 같고 부하도 같으므로 정격속도에서, 단위부피당 토크도 같다.

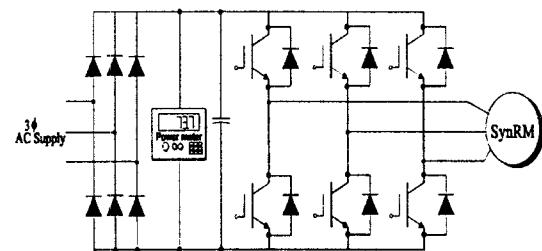


그림 2 실험의 구성도

4.1 효율

본 실험에서 효율은 다이오드 브리지와 DC링크 사이에서 디지털 전력계를 사용해 측정하였다. 실험결과는 표1에 나타난 것과 같다. 효율은 두 모터가 비슷한 결과를 보이고 있다. 동기형 릴럭턴스 모터가 낮은 역률에도 불구하고 회전자에서의 와류 손이 없기 때문에 유도전동기보다 손실이 적게되어 비슷한 양상이 나타난다. 그러나 본 논문에 사용된 회전자의 L_d/L_q 가 4 정도로 비교적 작게 설계가 되어있기 때문에 회전자 구조의 개선으로 효율을 더 높일 수 있으리라 본다.

4.2 중량과 관성

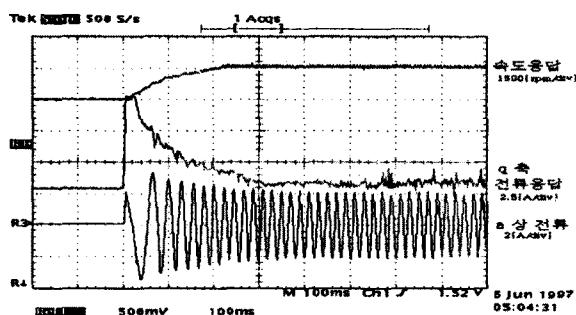
동기형 릴럭턴스 모터와 유도 전동기의 회전자 무게는 각각 2.38, 2.93 [Kg]이다. 동기형 릴럭턴스 모터는 엔드링 부분과 회전자 바가 없고 공기영역인 자속장벽(flux barrier)이 있어서 무게가 더 가볍다. 그러므로 관성모멘트도 동기형 릴럭턴스 모터가 $0.0034 [Kg \cdot m^2]$ 으로 $0.0042 [Kg \cdot m^2]$ 인 유도전동기보다 낮아서 속도 응답 특성이 향상된다.

표1 동기형 릴럭턴스 모터와 유도전동기의 특성비교

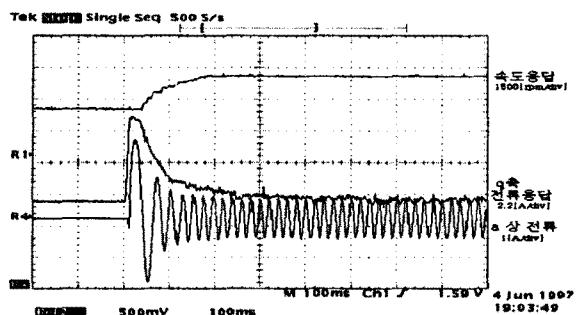
	동기형 릴럭턴스 모터	유도전동기
rpm	1500	1500
주파수(Hz)	50	50
토크(kgcm)	20.2	20.2
입력(W)	427.4	421.4
입력전압(V)	219.646	239.9
입력전류(A)	3.02	1.80
역률	0.372	0.577
출력(W)	311.181	311.181
효율[%]	72.808	72.31

4.3 벡터제어 특성 실험

속도 응답과 전류응답특성을 보기 위해 벡터제어 인버터로 구동실험을 행하였다. 그림2에서 보는 바와 같이 두 모터 모두 지령치에 잘 응답함을 알 수 있다. 그러나 동기형 릴럭턴스 모터에서의 전류가 유도전동기보다 크게 나타나는데, 이는 유도전동기에 비해 동기형 릴럭턴스 모터는 자기장하가 작고 전기장하가 크기 때문이다.



a) 동기형 릴럭턴스 모터



(b) 유도전동기

그림 2 무부하 실험

5. 결 론

본 논문에서는 동기형 릴럭턴스 전동기와 유도전동기의 실험에 의한 비교를 통하여 고정된 전력 소비 능력에 기초하여 동기형 릴럭턴스 모터와 유도전동기부터 얻을 수 있는 단위부피당 토크, 효율 등 여러 가지특성을 비교하였다.

제안된 동기형 릴럭턴스 모터의 토크 및 효율 등은 동일한 부피의 최적 설계된 유도전동기에 거의 동등함을 알 수 있었다.

제안된 모터의 회전자에 대한 최적 설계와 사구(skew)등을 통한 특성 향상 연구가 진행중이다.

(참 고 문 헌)

- P.J.Lawrenson and S.K.Gupta, "Developments in the Performance and Theory of Segmental-Rotor Reluctance Motors", ibid., 114, (5), pp.645-653, 1967
- Miller,T.J.E., Cossar,C., Hutton,A.J. and Staton, D.A., "Design of a Synchronous Reluctance Motor Drive", IEEE IAS Annual Meeting, San Diego, 1995
- A.El-Antably and T.L.Hudson, "The Design and Steady-State Performance of a High-Efficiency Reluctance Motor", in Conf. Rec. Annul Meeting IEEE IAS, pp.770-776, 1985
- M.Bilewski, L.Giordano, A.Vagati and F.Villata, "Control of High Performance Interier Permanent Magnet Synchronous Drives", IEEE IAS Annual Meeting, Seattle, U.S.A., pp.531-538, 7-12 October, 1990
- A.Vagati, G.Franceschini,I.Marongiu and G.P. Troglia, "Design Criteria of High Performance Synchronous Reluctance Motors", IEEE-IAS Annual Meeting, Houston, Texas, October 1992
- A.Fratta and A.Vagati, "Synchronous Reluctance Motor vs Induction Motor: a Comparison", PCIM 92, Nurnberg, Germany, pp.179-186, April 27-30, 1992,