

## ALA형 리럭턴스 동기 전동기의 특성해석

최경호\*, 김남훈\*, 백원식\*, 김동희\*, 황돈하\*\*, 김민희\*\*\*  
 \*영남대학교, \*\*한국전기연구원, \*\*\*영남이공대학

### Characteristic Analysis of the ALA-type Reluctance Synchronous Motor

Kyeong-Ho Choi\*, Nam-Hun Kim\*, Won-Sik Baik\*, Dong-Hee Kim\*,  
 Don-Ha Hwang\*\*, Min-Huei Kim\*\*\*

\*Yeungnam University, \*\*Korea Electrotechnology Research Institute, \*\*\*Yeungnam College of S&T

**Abstract** - This paper presents a detailed characteristic of reluctance synchronous motor (RSM) which has a axially laminated anisotropic (ALA) structure of the rotor. First of all, the analysis of a magnetic circuit field between stator and rotor should be achieved in order to predict the performance characteristics of the RSM. For the analysis of a magnetic circuit field, the finite element (FE) analysis is used. The analytical result of the inductance, flux distribution, vector potential and simulation results shows along with the load condition.

돌극비는 출력과 밀접한 관계를 갖는다. 돌극비, 즉  $L_d/L_q$ 비가 8이상이면 유도전동기와 유사한 성능을 가진다. 따라서 전동기의 설계 측면에서 돌극비를 최대화하려는 연구가 많이 이루어지고 있다[2-6].

본 연구에서 제안하는 동기형 리럭턴스 전동기는 회전자 철판 구조가 축방향으로 적층된 7.5 [kW]급으로서, 전동기 파라미터의 변화에 따른 특성 변화를 연구하고자 우선 FEM 해석을 통하여 인덕턴스 및 쇄교자속, 벡터 포텐셜 등을 분석하였고, 또한 측정결과로부터 그 결과들의 유사성을 확인하였다. 구해진 파라미터의 값을 적용하여 최대 토크특성을 얻기 위하여 시뮬레이션을 수행하여 전동기의 특성을 검토하였다.

## 1. 서 론

동기형 리럭턴스 전동기(Reluctance Synchronous Motor : RSM)는 회전자 손실이 없기 때문에 단위 체적당 토오크가 크고, 약제자 운전이 가능하며, 고온, 고속의 회전환경에서 동작이 가능한 장점을 가지고 있다. 근대에는 공업용 제봉기, 섬유, 제지산업, 펌프, 고효율 팬, 엘리베이터, 경량의 차량 등에 다양하게 적용이 시도되고 있고, 또한 기존의 유도전동기나 스위치드 리럭턴스 전동기의 대체 전동기로서 제안되고 있다[1-3]. 최근에는 새로운 설계기법의 적용에 따라 저역률 및 낮은 토크 등의 단점도 상당히 개선되어 기존 전동기에 비해 성능이 대등한 위치에 이르고 있다. 경제적인 면에서도 회전자 형상에 따라 다소 차이는 있지만 유도기에 비해 저렴하게 생산이 가능하며, 또한 스위치드 리럭턴스 전동기에 비해서는 토크 리플이 비교적 적은 장점을 가지고 있다[1-6].

RSM의 고정자 구조는 기존의 동기전동기 또는 유도전동기와 동일하며, 회전자는 돌극(saliency)을 갖는 구조로 되어 있다. 회전자의 돌극은 전동기의 출력과 밀접한 관계를 가지고 있다. 대표적인 RSM의 회전자 구조에는 전위장벽을 갖는 세그먼트형과 축이방향 적층형(Axially Laminated Anisotropic : ALA) 등이 있다. 세그먼트형은 유도전동기와 유사한 공정으로 제작이 가능하지만 기계적인 구조를 고려한 리브 등의 영향으로 돌극비가 낮아지는 단점을 가지고 있다. 그러나, 축이방향 성층형은 돌극비를 최대로 할 수 있는 구조로서 개개의 철판을 절곡하여 그 사이에 절연물을 삽입한 후 철판을 적층하여 볼트로 축에 고정하는 구조로 되어 있다. 따라서 제작공정이 많아지고, 또한 고속 회전자 볼트가 풀리는 현상이 나타날 수 있다.

RSM의 토크발생 원리는 고정자 권선에 전류가 인가됨으로써 자계가 형성될 때, 여자권선의 인덕턴스가 최대가 되도록, 즉 회전자의 리럭턴스가 최소가 되려는 방향으로 회전자 움직임이려는 특성을 이용한다. 동기형 리럭턴스 전동기의 토오크는 " $L_d-L_q$ "의 함수로 나타나고, 역률과 정출력은 " $L_d/L_q$ "의 함수이므로 전동기의

## 2. RSM의 형상 및 해석

### 2.1 회전자 형상

RSM의 회전자는 구조에 따라 세그먼트(Segmental)형과 축이방향 적층(ALA)형으로 크게 구분된다. 세그먼트형인 경우 Punched sheets of Lamination은 적용상 단순하지 않은 형상이 요구되더라도 제작공정이 간편하고 대량생산에 적합하나 회전자 설계시 제한된  $L_d/L_q$  비에 의하여 역률과 출력토크가 낮다는 단점을 가진다. 이에 반해 ALA형은  $L_d/L_q$ 의 비를 크게 할 수 있는 장점을 지닌다. 본 논문에서 사용된 회전자는 ALA형으로서 1/4분 단면을 그림 1에 나타내었다. 회전자의 기계적인 치수는 직경이 135 [mm], 길이 150 [mm]로 사다리꼴 형태의 코어 및 절연판을 축에 교대로 쌓아 전체 회전자를 구성한 것으로서, 코어는 S-30, 두께 0.5 [mm]의 규소강판, 절연판은 Nomex로서 두께 0.47 [mm]로 되어 있다. 돌극비를 최대로 하기 위해서는 코어 두께비가 0.5일 때이나 여기서는 0.48로 하였다[1,6]. 그리고 코어홀더는 비자성재료 사용하였다. 이러한 구조는 제작상의 어려움으로 인하여 가격이 고가이지만, 돌극비 면에서는 전위장벽형 구조에 비해 월등히 높은 값을 가진다.

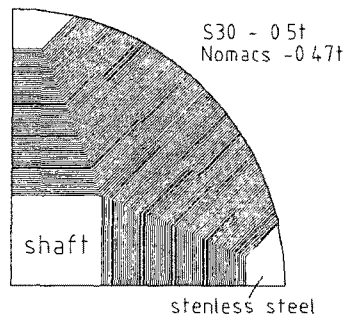


그림 1. ALA형 RSM의 회전자 형상

## 2.2 고정자 형상

동기형 리액턴스 전동기의 고정자는 유도전동기 또는 동기전동기와 동일한 구조로 되어있다. 본 연구에 적용된 고정자는 7.5 [kW] 4극 유도전동기의 회전자에 제거된 고정자를 사용하였다. 표 1에 RSM의 고정자 사양을 나타내었다.

표 1. RSM의 고정자 사양

출력	7.5 [kW]
정격속도	1800 [rpm]
극수	4
정격전압	380 [V]
결선	△결선
상저항	0.42 [ $\Omega$ ]
정격토크	17 [kg·m]
슬롯수	48
Air-gap	0.4 [mm]

## 2.3 전압 및 토크 방정식

그림 2는 리액턴스 동기전동기의 d-q 모델 등가회로를 나타내고 있다.  $R_m$ 에서 발생하는 철손과 자기포화를 무시하면, 리액턴스 동기전동기의 전압방정식과 운동방정식은 회전자 동기좌표계의 d-q 모델로서 식 (1)과 식 (2)로 표시되며, 두 식은 각각 동손, 자계 에너지 변화, 기계적 출력항으로 이루어져 있다. 토크는 식 (3)과 같고, 자속은 식 (4)로 표시되며, 역율은 식 (5)와 같이 표현된다. 여기서  $\phi_{ds}$ 와  $\phi_{qs}$ 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 자기인덕턴스이며,  $R_s$ 는 상당 고정자 저항이다.

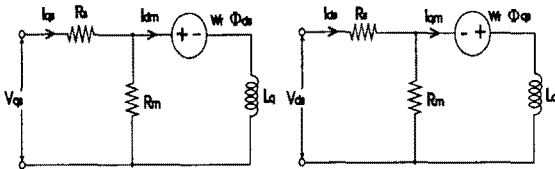


그림 2. RSM의 등가회로

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

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

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

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

$$\begin{aligned} \phi_{ds} &= L_{ls} I_{ds} + L_{md} I_{ds} = L_d I_{ds} \\ \phi_{qs} &= L_{ls} I_{qs} + L_{mq} I_{qs} = L_q I_{qs} \end{aligned} \quad (5)$$

$$\cos \phi = \cos(\delta + \pi/2 - \gamma) \quad (6)$$

식 (4)를 식 (2)에 대입하여 정리하면 식 (6)과 같이 토크 방정식을 다시 표현할 수 있다.

$$T_e = \left(\frac{3}{2}\right) \left(\frac{P}{2}\right) L_d \left(1 - \frac{L_q}{L_d}\right) I_{qs} I_{ds} \quad (7)$$

식 (6)에서 토크는 고정자 전류벡터  $I_s$ 의 크기와 d-q 축 인덕턴스의 차에 의해서 결정되고, 돌극비( $L_d/L_q$ )가 토크의 중요한 요소임을 알 수 있다.

## 2.4 $k = L_d/L_q$ 계산 및 측정

RSM의 토크특성은 식 (6)에서와 같이  $L_d/L_q$ 의 변화에 의해 결정되므로 실험용 전동기의  $L$ 값을 먼저 알아야 한다. 토크의 측정은 상용주파수에서 AC 전압을 인가하여 측정하였고(2), 유한요소 해석에 의해 전류를 변화시켰을 때 회전자를 이동시키면서  $L$ 값을 계산하였다.

그림 3은 전류(pu값)에 따른 d축 인덕턴스  $L_d$ 로서 FEM에 의한 해석결과와 측정결과를 나타낸다. FEM 해석은 상용프로그램인 Flux-2D를 사용하였다.  $L_d$ 값은 전동기 정격전류에서 해석결과 85.5 [mH]로 나타났고, 측정치는 96.3 [mH]로 됨을 알 수 있다. 측정치가 높게 나온 것은 코일 엔드 부분의 플린징 현상과 누설 및 상호 인덕턴스의 영향에 의한 것으로 추정된다.

그림 4는 회전자의 변화시 전류에 따른  $L$ 값의 변화를 FEM으로 해석한 결과를 나타내고 있다. 최소전류와 정격전류의 사이에 12 [%] 정도 저하되었으나,  $L_q$ 값은 10 [mH]로 거의 변화가 없음을 알 수 있다.

그림 5는 단위전류당 최대 토크를 낼 때의 전류에 따른  $L_d/L_q$ 의 비를 나타낸 것으로서, 전류가 1 pu에서는 8.2, 0.1 pu에서는 9.4로 구해졌으며, 포화영역이 넘는 부분에서는 7.7로 나타남을 볼 수 있다.

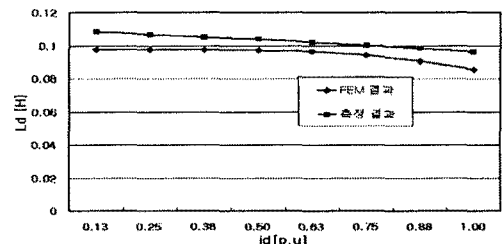


그림 3. FEM 해석치와 측정치의  $L_d$ 값 비교

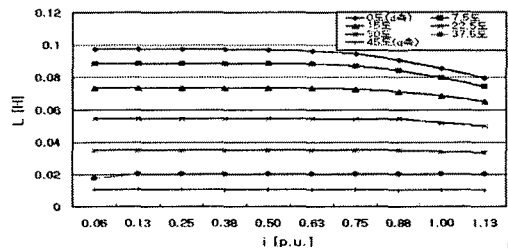


그림 4. 계산된  $L$ 값

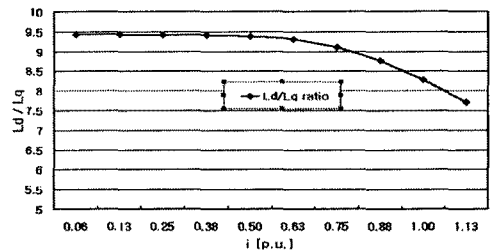


그림 5. 전류에 따른  $L_d/L_q$  비

## 3. 유한요소 해석 및 시뮬레이션

### 3.1 FEM 해석

RSM의 회전자와 고정자의 자속왜곡 특성을 알아보기 위하여 유한요소해석을 수행하였다. 고정자의 자기회로

는 하나의 극을 2차원으로 해석하였다. 코일 엔드 턴의 영향과 플린징에 의한 리액턴스는 무시하였다. 그림 6은 1상의 d축 정격전류가 z축 방향으로 인가시 등가자속, 벡터 포텐셜, 공극자속 밀도를 나타낸 것으로서, 벡터의 방향은 거의 d축으로만 이동되고 q축으로는 거의 이동되지 않아 인덕턴스 비를 크게 할 수 있다. 이때 공극의 자속은 최대 1.2 [T]로 나타났다.

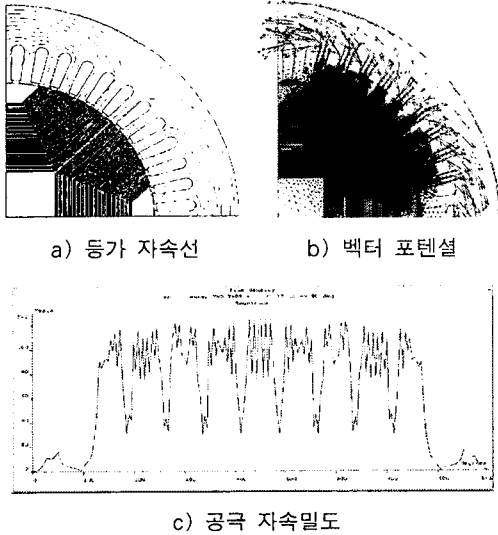


그림 6. d축 여자시 등가자속, 벡터 포텐셜 및 공극 자속밀도

### 3.2 시뮬레이션 결과

일반적으로 RSM의  $L_d$ ,  $L_q$ 는 제작시 정격에 의해서만 표시되나, 본 논문에서는 FEM을 이용하여 각 전류에 따라 최대 토오크가 발생하는 위치에서 구한  $L_d$ ,  $L_q$  값을 룩업 테이블로 작성하여 그 값이 각각의 전류 변화에 적용될 수 있도록 하였다. 시뮬레이션은 직접토크 제어에 의한 RSM의 속도제어를 수행하였다. 자속추종은 파라미터 변화에 민감한 전류모델 자속 관측기를 사용하였으며, 인덕턴스  $L_d$ ,  $L_q$  값을 전류의 변화에 따라 추종하게 하였다. Matlab/Simulink를 사용하여 수행한 시뮬레이션의 전체 구성도를 그림 7에 나타내었다. 시뮬레이션은 속도 추정 및 단위 전류당 최대 토오크를 얻기 위한 전류를 관찰하기 위하여 속도별, 부하별로 수행하였다. 그림 8 (a)는 부하토크를 5 [Nm]로 일정하게 두고 기준속도가  $\pm 1000$  [rpm]일 때의 속도 응답특성으로서 지령속도에 0.2초 이내에 속도추정이 양호하게 이루어짐을 알 수 있다. 그림 8의 (b)와 (c)는 이때의 전류 파형과 토크 응답 파형을 나타낸다.

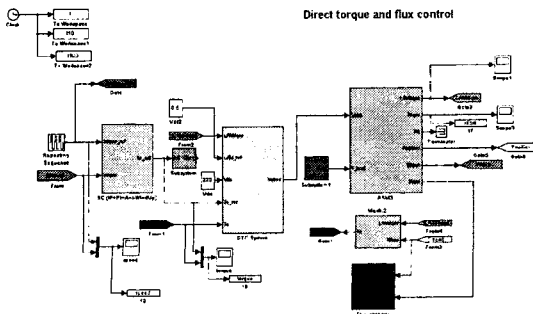


그림 7. 시뮬레이션의 전체 구성도

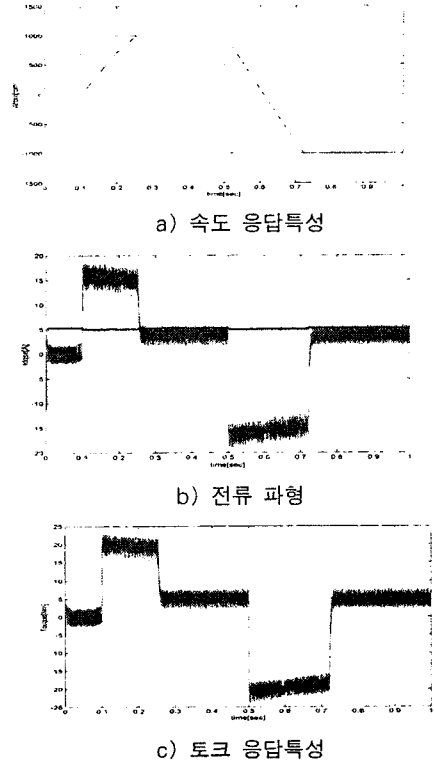


그림 8. 1000 [rpm], 5 [Nm]시의 시뮬레이션 결과

### 4. 결론

본 연구에서는 ALA형 동기형 리럭턴스 전동기가 최대 토오크를 얻는 위치각에서 전동기의 특성변화를 고찰하였다. 우선 최대 토오크와 직접 관계된 인덕턴스를 전류와 위치각에 따라 FEM 자체해석을 이용하여 구하는 방법을 제안하였으며, 제안된 방법에 의해 구해진 인덕턴스는 측정치와 비교하여 양호한 결과를 얻을 수 있었다. 또한, 단위 전류당 최대 토오크를 얻기 위한 방법으로는 일정 토크에서 해석된 인덕턴스를 각각의 부하 및 속도별 적용하여 전류 변화로서 특성을 분석하였다. 시뮬레이션 결과 최대토크는 d축과 q축이  $\pi/4$ 에서 최소 전류가 인가되는 것을 확인할 수 있었다. 본 논문에서 제시한 유한요소 해석을 이용한 인덕턴스 산정 및 Matlab/Simulink를 통한 전동기 시뮬레이션 결과는 향후 실제 전동기 제작 실험에 앞서 전동기의 특성을 얻기 위하여 유용하게 활용될 수 있으리라 기대된다.

### (참 고 문 헌)

- [1] A. Vagati and T.A. Lipo, "Synchronous Reluctance Motors and Drives: A New Alternative", IEEE IAS Annual Meeting Tutorial, Oct. 1994.
- [2] 김민희, 김남훈, 김민호, "직접 토크 및 자속 제어에 의한 유도전동기의 위치제어 시스템", 전기학회논문지, 제49P권, 제2호, pp. 22-28, Oct. 2000.
- [3] R. Lagerquist, I. Boldea, and T.J.E. Miller, "Sensor-less Control of the Synchronous Reluctance Motor", IEEE Trans. on I.A., Vol. 30, No. 3, pp. 673-682, May, 1994.
- [4] 김민희, 김남훈, 백원식, "직접 토크제어에 의한 위치검출기없는 리럭턴스 동기전동기의 고성능 제어시스템", 전력전자학회 논문, 제7권, 제1호, pp. 81-90, Feb. 2002.
- [5] 김민희, 김남훈, 최경호, "직접 토크제어에 의한 리럭턴스 동기전동기의 고성능 위치제어 시스템", 전기학회논문지, 제51B권, 제3호, pp.150-157, Mar. 2002.
- [6] 최경호, 김남훈, 백원식, 김동희, 황돈하, 김민희, "1 kW급 리럭턴스 동기전동기의 특성해석", 대한전기학회 EMECS 학회 순계학술대회 논문집, pp. 119~122, 2002. 4.