

2차측 도체바를 갖는 동기 릴럭턴스 모터의 토크 특성

장석명, 박병임, 이성래, 이성호, 윤기갑\*  
 충남대학교 전기공학과, 한국전력공사 전력연구원\*

Torque characteristics of Synchronous Reluctance Motor with secondary conductor bar

Seok-Myeong Jang, Sung-Lae Lee, Pyoung-Im Park, Sung-Ho Lee, Ki-Gap Yoon\*  
 Department of Electrical Engineering of Chungnam National University, KEPRI\*

**Abstract** - The Synchronous Reluctance Motor(SynRM) was made and experimented. Salient type SynRM was manufactured by cutting two sides of the three phase squirrel cage rotor. So this prototype motor has same stator and capability with the counterparts of the induction motor. The airgap flux density, inductance and torque characteristics was inspected by Finite Element Analysis (FEA). The static torque experiments was accomplished. The paper proposed the effect of rotor bar by comparing two models.

1. 서 론

현재 우리 생활에 가장 널리 사용되고 있는 모터는 유도 전동기이다. 유도 전동기는 간단하고 튼튼하며 유지 및 보수가 쉽다. 그러나 동손과 철손에 의한 열이 발생하고, 특히 고속 구동 시 낮은 효율과 역률이 문제가 된다. 따라서 유도 전동기를 대신할 만한 새로운 모터들이 등장하게 되었고 이들 모터들을 기존의 유도 전동기가 사용되던 영역에 응용하기 위한 연구가 진행중이다.

영구자석(PM)형 모터는 고효율, 고역률이므로 가장 이상적인 모터로 여겨지지만 비용 및 내구성 슬롯 리플 등이 문제가 된다. 스위치드 릴럭턴스 모터(SRM)는 구동 드라이브가 간단할 뿐만 아니라, 회전자 권선이 없으므로 2차측 동손이 발생하지 않는다. 그러나 고정자 권선의 동손과 토크 맥동에 의한 소음과 진동이 크므로 이를 개선해야 할 필요가 있다. 동기 릴럭턴스 모터는 저역률, 기동문제 등으로 그리 주목을 받지 못했다. 그러나 전력전자의 발달 및 적절한 설계를 통하여 이들 문제들이 점차 개선되고 있다.

본 논문에서는, 회전자 구조가 간단하고 다른 모터에 비해 비교적 제작이 용이한 형태인 돌극형 동기 릴럭턴스 모터를 다루었다. 서로 다른 회전자 구조를 갖는 두 모델의 토크 특성을 FEA와 정특성 실험을 통해 비교하였다. 이 결과를 통해 2차측 도체바를 갖는 SynRM의 유도 전동기 이상의 토크 성능을 예측할 수 있었다.

2. SynRM의 유한요소 해석

2.1 해석 모델

회전자 구조가 다른 두 모델이 그림 1에 있다. 그림 1(a)모델은 농형 유도 전동기를 동기 릴럭턴스 모터의 형태로 개조한 것이다. 제작된 그림 1(a)모델의 회전자가 그림 2에 있다. 그림 1(b)모델은 회전자에 알루미늄 바가 없는 동기 릴럭턴스 모터이다. 이들 두 모델은 동일한 고정자와 용량을 갖는다. 표 1은 제작된 동기 릴럭턴스 모터의 사양을 나타낸 것이다.

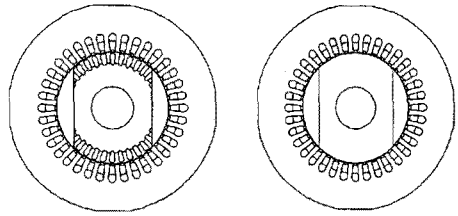


그림 1. 해석모델의 단면  
 (a) 회전자에 알루미늄바가 있는 SynRM  
 (b) 회전자에 알루미늄바가 없는 SynRM

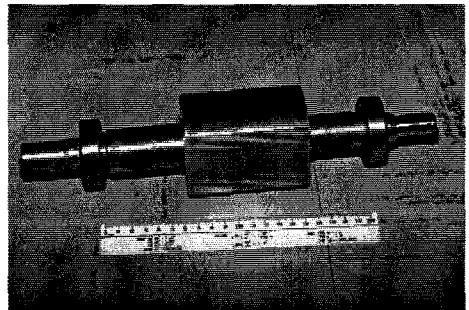


그림 2 제작된 SynRM의 회전자

표1 제작된 SynRM 사양

파라미터	값
고정자 외경	148 [mm]
고정자 내경	80 [mm]
회전자 직경	79.6 [mm]
축방향 길이	91.4 [mm]
공극 길이	0.4 [mm]
슬롯 수	36
슬롯 피치	7.485 [mm]
극 수	2
입력 전압	220/380 [V]
병렬 회로수	1Δ/1Y
도체 직경	0.95 [mm]
상 당 코일수	6
슬롯 당 도체수	28

## 2.2 해석을 위한 SynRM의 토크 방정식

동기 릴럭턴스 모터는 인버터에 의해 동기적으로 기동이 가능하므로 일반적으로 계자 권선과 회전자의 케이지는 생략된다. 따라서 d-q축 방정식은 계자 권선과 제동 권선을 모두 제거한 식 (1) ~ (4)로부터 얻을 수 있다.

$$v_{ds} = r_s i_{ds} + D\lambda_{ds} - \omega_r \lambda_{qs} \quad (1)$$

$$v_{qs} = r_s i_{qs} + D\lambda_{qs} + \omega_r \lambda_{ds} \quad (2)$$

$$\lambda_{ds} = L_{ls} i_{ds} + L_{md} i_{ds} = L_{ds} i_{ds} \quad (3)$$

$$\lambda_{qs} = L_{ls} i_{qs} + L_{mq} i_{qs} = L_{qs} i_{qs} \quad (4)$$

여기서  $L_{ls}$ ,  $L_{md}$ ,  $L_{mq}$  은 각각 고정자 누설 인덕턴스, 직축 자화 인덕턴스, 횡축 자화 인덕턴스이다. 따라서 전자기 토크는 식 (5)과 같다.

$$T_e = \frac{3}{2} P_1 (\lambda_{ds} i_{qs} - \lambda_{qs} i_{ds}) = \frac{3}{2} P_1 (L_{ds} - L_{qs}) i_{ds} i_{qs} \quad (5)$$

여기서,  $L_{ds}$  와  $L_{qs}$  는 누설 성분과 자화 성분을 포함한다.

## 2.3 각 모델의 FEA에 의한 자속 분포

d축과 q축 여자 시 자속 분포 형상을 그림 3에 나타내었다. q축 여자의 경우 공극 영역에서의 자기 저항이 철심에 비해 크기 때문에 자속이 잘 통과하지 못한다. 전류각에 따른 자속밀도 분포는 그림 4에 있다. 해석 결과 그림 1의 (a) 모델과 (b) 모델의 자속밀도는 거의 일치함을 볼 수 있다.

상전류에 따른  $L_d$ ,  $L_q$  의 변화는 그림 5에 있다. q축 인덕턴스는 거의 일정한데 반해, q축 인덕턴스는 포화되기 시작하면서 급격히 감소한다.

FEA를 통해 얻은 (a), (b) 모델의 토크를 그림 6에 비교해 놓았다. 두 모델의  $L_d$ ,  $L_q$  값이 근사하므로 토크 값에도 그리 큰 차이는 없지만 회전자에 알루미늄 바가 없는 경우의 토크 특성이 약간 더 좋음을 알 수 있다.

두 모델의 비교를 통해 2차축 도체 바의 유무가 자속 밀도 및 토크 특성에 영향을 미침을 알 수 있었다.

돌극비는 토크 및 출력에 영향을 미치는 중요한 요소인데 해석 결과 제작된 모터의 경우 4.2 정도의 비를 얻었다.

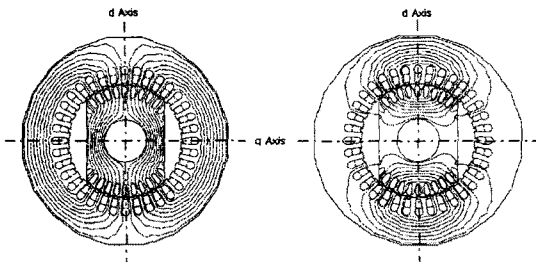
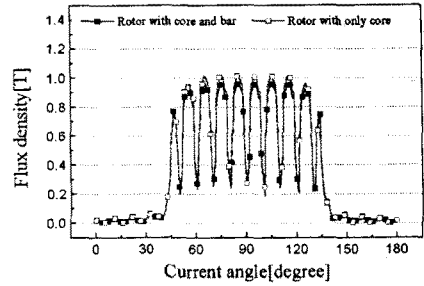
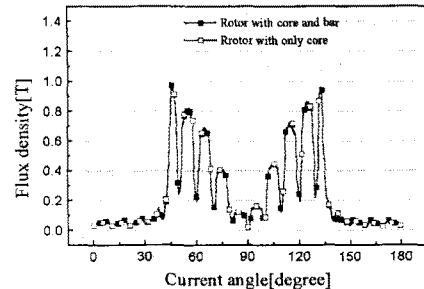


그림 3. d축과 q축 자속 분포



(a) D-axis



(b) Q-axis

그림 4 전류각에 따른 공극 자속 밀도

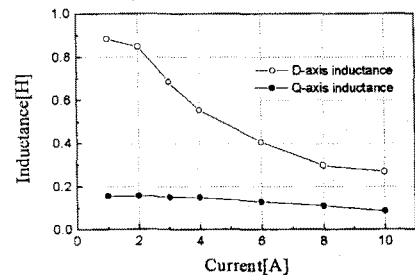


그림 5 전류에 따른  $L_d$ ,  $L_q$

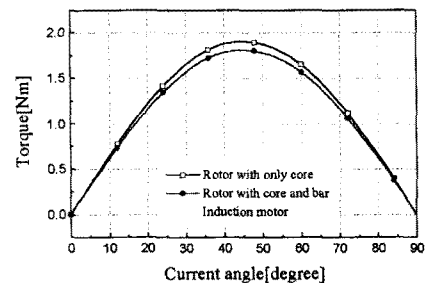


그림 6 제시된 두 모델의 FEA에 의한 토크 비교

### 3. 정특성 실험 결과

#### 3.1 실험 구성도

SynRM의 정토크 측정을 위한 시스템이 그림 7에 있다. 측에 연결된 로드셀을 이용하여 힘을 측정하였다. d축을 기준으로 회전자를 회전시켜 전류각을 변화시키고 이 전류각에 따른 토크를 측정하였다. (그림8)

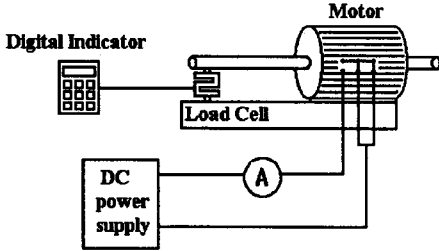


그림 7 토크 측정 시스템

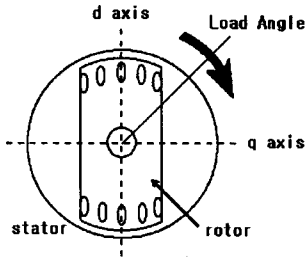


그림 8 회전자의 회전에 따른 전류각 변화

#### 3.2 토크 특성

실험으로 얻은 토크를 그림 9에 나타내었다. 그림 1의 (a), (b) 두 모델에 대한 FEA 해석치와, 회전자에 알루미늄 바가 있는 개조형 동기 릴럭턴스 모터의 실험치 비교가 함께 이루어졌다.

개조된 동기 릴럭턴스 모터는 2차측에 알루미늄 바가 없는 돌극 형 동기 릴럭턴스 모터에 비해 토크가 작게 나타났다. 두 경우 모두 전류각이 45도일 때, 가장 당기는 힘이 크게 나타났다.

제작된 동기 릴럭턴스 모터의 실험치는 해석치와 거의 일치하였다.

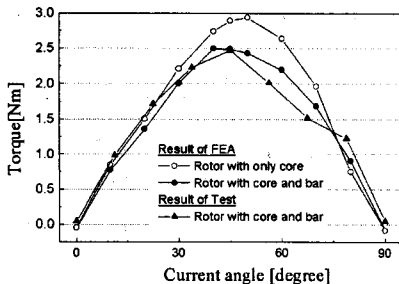


그림 9 전류각에 따른 토크 특성 비교

### 4. 결 론

제안된 두 모델 즉, 회전자에 바가 있는 동기 릴럭턴스 모터, 바가 없는 릴럭턴스 모터의 토크 특성을 FEA와 정토크 실험을 통해 알아보았다. 실제로 농형 유도 전동기를 제조하여 회전자에 바가 있는 동기 릴럭턴스 모터의 제작이 이루어졌고, 이 모터의 해석을 실험을 통해 뒷받침하였다.

- 공극 자속 밀도 분포 및 토크 특성은 회전자의 형태와 도체 바의 유무에 영향을 받을 수 있었다.
- 발생 토크는 회전자에 바가 없는 동기 릴럭턴스 모터의 경우가 바가 있는 모델보다 약간 더 크다. 동기 릴럭턴스 모터의 초기 형태인 회전자에 농형 바가 있는 경우는 기동 문제가 문제되지 않는 한 없는 것이 토크 특성이 좋다.

향후, 역률, 효율 등과 동특성 실험에 대한 내용을 다루고자 한다.

### 참고문헌

- [1] A.Vagati: "On the evolution of A.C. Machines for spindle drive application" in conf. Rec. 1989 IEEE I.A.S pp. 699-704
- [2] I. Boldea: "Reluctance synchronous machines and drives" Clarendon Press. Oxford. 1996, Chap1.pp.15-18
- [3] "Synchronous Reluctance Motors and Drives" A New Alternative. 1994 IEEE I.A.S pp 18-20
- [4] A.Vagati: Synchronous Reluctance vs Induction Motor: a comparison in conf. Rec. 1989 IEEE I.A.S pp. 699-704