

## 토크비 개선을 위한 자속 장벽형 회전자 구조 동기 릴럭턴스 전동기의 설계

장석명\*, \*박병임\*, 이성호\*, 이종호\*\*  
 충남대 전기공학과, 충북과학대 전기공학과

### Design of Flux Barrier type Synchronous Reluctance Motor to improve Saliency Ratio

S.M. Jang\*, \*P.I. Park\*, S.H. Lee\*, J.H. Lee\*\*  
 \*Chung-Nam National Univ. \*\*C' TECH

**Abstract** - It is demonstrated that the torque performance of the flux barrier type synchronous reluctance motor(SynRM) can be improved in terms of geometric parameters. Torque and power factor are related to the difference of inductances and the saliency ratio. And these inductance characteristics are determined by the geometric parameters of rotor: the number of layers, the width of iron to the width of flux barrier( $K_w$ ), slot number and shape, airgap, bridge, etc. The relationship between geometric parameters, especially,  $K_w$  and motor performance will be studied. This paper shows that torque and power factor are improved through redesign with considering geometric parameters. Performance comparisons of proto type SynRM and improved SynRM are given by FEA(Finite Element Analysis).

#### 1. 서 론

가정 및 산업용 전동기의 대다수는 유도 전동기가 차지하고 있지만, 특정 분야에서 유도 전동기를 대체할 새로운 전동기의 필요성이 증대되었다. 근래, 주목을 받고 있는 대표적인 전동기들은 동기형 릴럭턴스 전동기와 스위치드 릴럭턴스 전동기, 영구 자석형 전동기이다. 이들 중 동기형 릴럭턴스 전동기(Synchronous Reluctance Motor: SynRM)는 최근 30여년 동안 단점이었던, 저효율, 저출력 특성이 전력 전자의 발달과 더불어 개선되면서, 많은 연구가 이루어지고 있다. 동기형 릴럭턴스 전동기 역시 스위치드 릴럭턴스 전동기와 마찬가지로 회전자에 권선이 없어 간단한 구조이며, 따라서, 전동기에서 발생하는 손실의 대부분은 고정자의 동손이 차지한다. 이런 특성으로 잠시간의 운전이 필요한 곳에 적합하고, 유지 보수가 용이하다는 장점을 갖는다.

동기형 릴럭턴스 전동기는 성층 방법에 따라 축방향 성층형과, 횡방향 성층형으로 분류하는데, 단편형 동기형 릴럭턴스 전동기는 횡방향 성층형에 속한다. 축방향 성층형의 경우, 돌극비는 개선되지만 구조가 복잡하고 축에 회전자 철심을 고정 시키는 문제 등 제작 및 비용 면에 어려운 점이 있다. 이에 비해 단편형 회전자 구조의 동기형 릴럭턴스 전동기는 제작이 비교적 용이하고, 고정자의 슬롯으로 인해 발생하는 토크 리플을 스류를 이용해 개선시킬수 있으며, 적당한 설계를 통해 축방향 성층 못지 않는 높은 토크비를 가질수 있다. 따라서, 비교적 제작이 용이한 단편형 회전자 구조를 설계 모델로 선정하여 제작 및 특성 실험을 수행하였으나, 이 모델은 토크비가 낮으므로 본 논문에서는 이 시작기의 재 설계를 통해 토크 및 역률 특성을 개선하였다[4].

전동기 특성에 슬롯이나 자속 장벽, 공극, 브리지 등이 설계 변수로 적용된다. Lipo는 단편형 회전자의 최적 설계시 자속 장벽의 수, 철심 두께에 대한 자속 장

벽 두께의 비,  $K_w$ , 슬롯수 및 슬롯의 형태 등의 변수들이 전동기 특성에 미치는 영향을 고려하였다[1]. 축방향 성층형의 경우,  $K_w$ 에 대한 연구가 이미 이루어졌고, 최적의  $K_w$ 는 0.5정도의 값을 갖는다[2]. 따라서, 구조가 다른 이 단편형 회전자 구조의 동기형 릴럭턴스 전동기에서  $K_w$ 를 가 토크 및 역률에 미치는 영향을 주로 다룬다.

#### 2. 동기형 릴럭턴스 전동기의 기본 특성식

동기형 릴럭턴스 전동기의 토크와 역률은 아래와 같다.

$$T_e = \frac{3}{2} \cdot \frac{P}{2} (L_{ds} - L_{qs}) i_{ds} i_{qs} \quad (1)$$

$$i_{ds} = I_s \cos \theta, \quad i_{qs} = I_s \sin \theta \quad (2)$$

(2)식을 (1)식에 대입하면, 아래 토크식을 얻을 수 있다.

$$T_e = \frac{3}{2} \cdot \frac{P}{2} (L_{ds} - L_{qs}) \cdot \frac{1}{2} \cdot I_s^2 \sin 2\alpha \quad (3)$$

또한,  $\cos \phi$ 는 전압 벡터의 크기로 나뉘는 전류 벡터에 대한 전압 벡터의 투영으로 나타낼 수 있다[1].

$$\cos \phi = [V_{qs} \sin \epsilon + V_{ds} \cos \epsilon] / \sqrt{V_{qs}^2 + V_{ds}^2} \quad (4)$$

여기서,  $V_{ds}$ ,  $V_{qs}$ ,  $\epsilon$ 는 각각 회전자 기준 프레임의 d 축, q축 정상상태 전압, mmf 각을 나타낸다. 식 (4)를  $x = L_{ds}/L_{qs}$ 의 함수로 나타내면, 최대 역률을 얻을 때

$$\tan \epsilon = \sqrt{k} \quad (5)$$

이고, 이 값에서 기기는 최적의 에너지 변환 특성을 갖는다고 볼 수 있다.

$$\cos \phi_{\max} = (x-1) / [\sqrt{x^2 \cdot 1/[x/(1+x)] + 1/[1-x/(1+x)]}] = (x-1)/(x+1) \quad (6)$$

즉, (3), (6)식에서 인덕턴스의 차와 비가 클수록 토크와 역률이 커진다[3].

#### 3. 회전자 설계

##### 3.1 설계 모델과 고려 사항

동기형 릴럭턴스 전동기의 고정자 구조는 유도전동기의 고정자와 같은 구조를 가지므로, 주 설계 대상은 회전자이다. 본 논문은 3개의 자속 장벽을 갖는 시작기의 토크 특성을 개선시키는 데 중점을 두고 설계하였다. 표 1은 시작기의 사양이고, 그림 1은 단편형 회전자의 단면도이다.

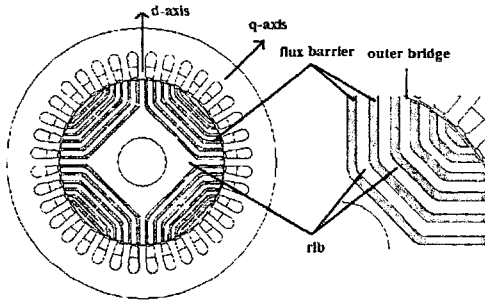


그림 1 단편형 회전자의 단부

표 1 시작기의 설계 사양

멀티 단편형 동기형 릴럭턴스 전동기	
상수	3
극수	4
출력 [W]	400
정격속도 [rpm]	1750
1차 저항 [ $\Omega$ ]	2.82
철손 등가 저항 [ $\Omega$ ]	147
$L_d$ [mH]	302.5
$L_q$ [mH]	122.0
회전자 적층 길이 [mm]	55
공극 [mm]	0.4

식(3), (11)처럼 토크 및 역률이 인덕턴스 특성에 따라 결정되므로 회전자의 최적 설계는 2개의 중요한 요소, ( $L_d - L_q$ )와  $L_d/L_q$ 에 기본을 둔다. 따라서,  $L_q$ 를 최소로 하기 위해, 낮은 전류 레벨에서도 쉽게 포화되도록 철심 부분의 폭을 반경 방향으로 얇게 하고,  $L_d$ 를 최대로 하기 위해, 극 양단의 자속 장벽의 깊이를 충분히 크게 한다.

### 3.2 토크 및 역률에 영향을 미치는 설계 변수들

단편형 회전자의 설계 시 자속 장벽의 수, 철심 두께에 대한 자속 장벽 두께의 비,  $K_w$ , 슬롯 수 및 슬롯의 형태 등의 변수들은 모터의 토크 및 역률 특성에 영향을 미친다(1). 자속 장벽을 이용해 q축 자속의 흐름을 억제하는데, 이 장벽의 수는 적당히 늘려  $L_q$ 를 감소시킬 수 있으나, 너무 많아도 성능이 약해진다. 슬롯 수를 감소시키면,  $L_d$ 는 감소하고 무엇보다 슬롯의 bridge effect에 의해,  $L_q$ 가 증가하므로  $L_d/L_q$ 도 감소하게 된다. 일반적으로  $L_d/L_q$ 비를 증가시키기 위해 공극은 작게 하나, 공극이 너무 작아도 회전자 손실이 증가한다. 본 설계 모델의 공극은 유도기와 같은 0.4 mm이다. 단편형 회전자 구조의 동기형 릴럭턴스 전동기는 구조상 필연적으로 회전자의 바깥 부분에 브리지가 존재한다. 이 브리지의 폭이 넓을수록 누설자속의 영향으로 q축 인덕턴스가 증가하여, 토크는 감소한다. 토크는 브리지 폭이 좁아짐에 따라 증가한다. 성능이나 강도를 고려하여 선택한 설계 모델의 브리지는 0.5mm이다.

### 3.3 $K_w$ 가 토크에 미치는 영향

위의 변수들 외에 회전자 세그먼트의 폭과 세그먼트 간 절연 폭의 비인  $K_w$ 도 토크 및 역률 특성에 영향을 미치는데, 본 논문에서는 이 변수를 중점적으로 고려하였다. 철심 재료는 시작기와 동일한 S40를 사용하였고, 자속 장벽 영역은 공기영역으로 해석하였다.

$$K_w = \frac{\sum(W_{air})}{\sum(W_{iron})} \quad (7)$$

여기서,  $\sum(W_{air})$ 와  $\sum(W_{iron})$ 는 각각 전체 자속 장벽의 폭과 전체 회전자 철심 영역의 폭이다.

### 3.4 설계 알고리즘

단편형 회전자 구조 동기형 릴럭턴스 전동기의 설계 순서도는 그림 3에 나타내었고, 그림 2에서 모든 회전자 세그먼트들의 합은 고정자 요크와 같다는 가정에서 아래 식들이 성립한다.

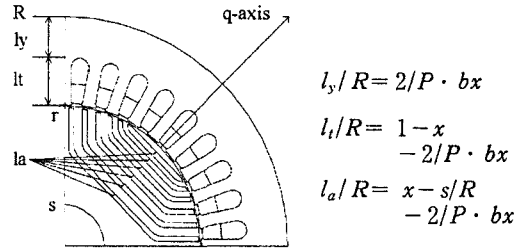


그림 2. 설계 모델의 구조도

## 4. 유한 요소법에 의한 특성해석

그림 4에  $K_w$ 에 따른 자속 및 자속 밀도 분포를 나타내었고, 그림 5, 6은 시작기와 개선된 모델의  $K_w$ 에 대한  $L_{md} - L_{mq}$ ,  $L_{md}/L_{mq}$  및 토크, 역률 특성을 나타낸 것이다.  $L_{md} - L_{mq}$ 의 최대값은  $K_w$ 가 0.5와 0.8 사이에 있을 때 발생한다. 따라서, 토크 특성도 0.5~0.8 사이에서 높은 값을 유지한다.  $K_w$ 가 작아야 회전자의 철심 부분이 크고, 따라서 자속 밀도가 낮아지며, 철심의 맥동 손실이 감소하기 때문에, 일반적으로,  $K_w$ 를 가능한 작게 하는 것이 바람직하다. 제작 상  $K_w$ 를 아주 작게 할 수는 없으므로, 0.5정도의 값이 최적점이 된다.

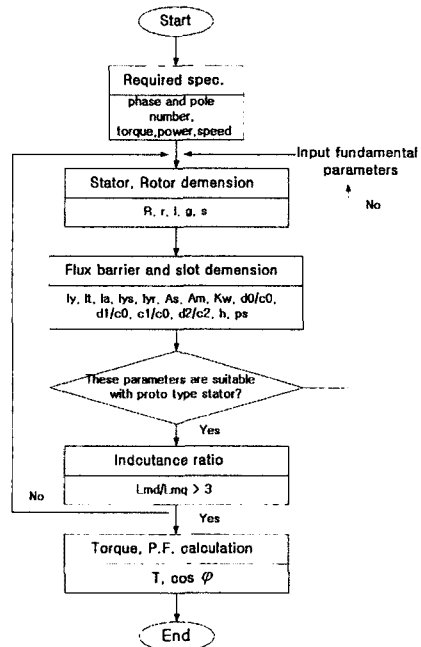
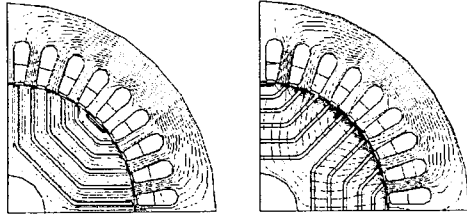
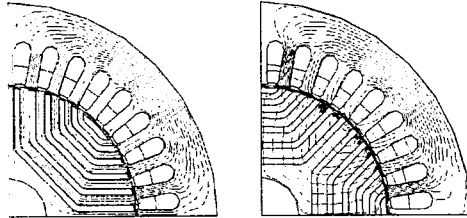


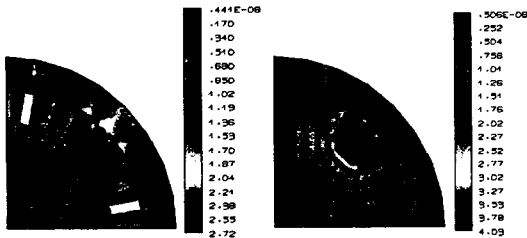
그림 3 단편형 회전자 구조의 SynRM 설계 순서도



(a)  $K_w$ 가 0.3일때의 자속 분포



(b)  $K_w$ 가 0.8일때의 자속 분포



(c) d축 여자 시  $K_w$ 가 0.3, 0.8일때의 자속 밀도

그림 4.  $K_w$ 에 따른 자속 및 자속밀도 분포도

그림 7, 8은 초기 모델과 개선된 동기형 릴럭턴스 전동기의 전류에 따른 인덕턴스 특성을 비교한 것이다. 0.3의  $K_w$  값을 갖는 시작기보다 0.5의 값을 갖는 재 설계된 전동기의 토크 및 역률이 개선되었음을 확인하였다. 4A에서 포화가 일어나기 시작하면서 d축 인덕턴스가 감소하고, 따라서, 이후, d, q축 인덕턴스의 차이 및 비도 감소한다.

## 5. 결론

본 논문에서는 4극 단편형 회전자를 갖는 동기형 릴럭턴스 전동기의 설계 시  $K_w$ 를 고려하여, 토크 및 역률을 개선하였다. 자속 장벽과 자속 장벽 간 절연 물질 폭의 비인  $K_w$ 는 0.5-0.8에서 토크 및 역률에 영향을 미치는 인덕턴스 특성이 양호하다. 자속 장벽의 수를 6개로 늘리고  $K_w$ 를 0.5로 재 설계시 토크비는 3.74에서 6으로 개선되었고, 이에 따라 토크와 역률은 각각, 10%, 20% 증가한 개선된 특성을 얻을 수 있었다.

### [참고 문헌]

- (1) Takayoshi Matsuo, Thomas A.Lipo, "Rotor Design Optimization of Synchronous Reluctance Machine", 1993 IEEE pp. 359-365
- (2) Hiroyuki Kiriya, Shinichiro Kawano, Yukio Honda, Toshiro Higaki, "High Performance Synchronous Reluctance Motor with Multi-flux Barrier for the Appliance Industry", 1998 IEEE pp. 111-117.

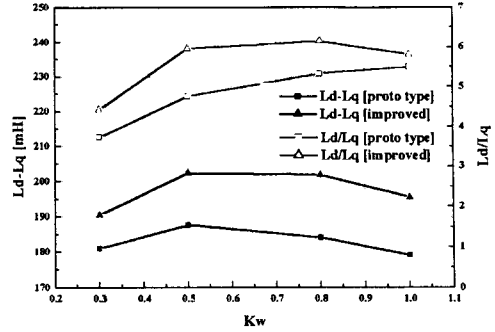


그림 5  $K_w$ 에 따른  $L_d-L_q$ ,  $L_d/L_q$

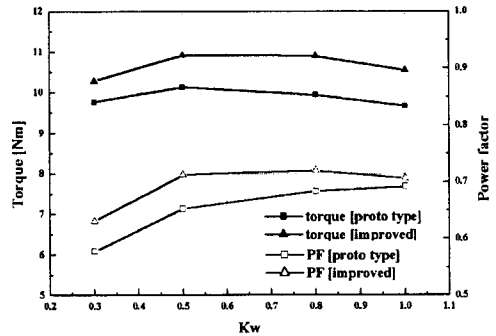


그림 6.  $K_w$ 에 따른 토크 및 역률 특성

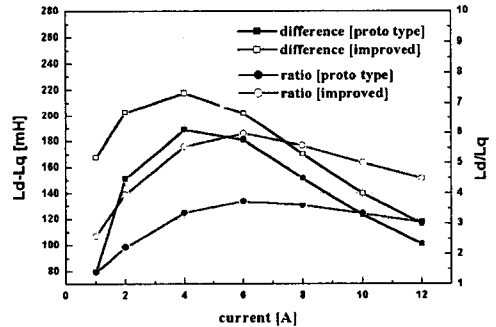


그림 7. 전류에 따른  $L_d-L_q$ ,  $L_d/L_q$  특성

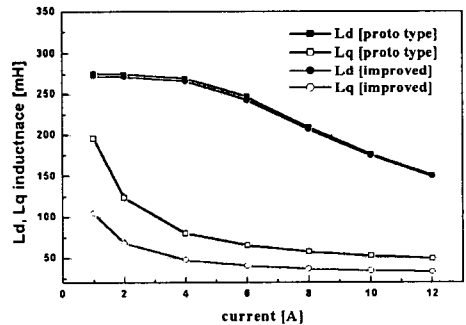


그림 8. 전류에 따른  $L_d$ ,  $L_q$  특성

- (3) "Synchronous Reluctance Motors and Drives A New Alternative", IAS'94, pp. 1.7-1.15, 3.1-3.34.
- (4) 이종호, 김정철, 현동석, "유한 요소법을 이용한 단편형 회전자 구조 동기형 릴럭턴스 전동기 특성 해석", 1998 전기학회논문지 8월호 1116-1122.