

단편형 동기 릴럭턴스 전동기의 토크 및 역률 개선을 위한 회전자 설계

論 文
50B-6-2

Rotor Design of a Segmented Type Synchronous Reluctance Motor to Improve Torque and Power Factor

張錫明** · 朴炳任* · 李成浩*** · 李重浩§
(S. M. Jang · P. I. Park · S. H. Lee · J. H. Lee)

Abstract - The paper presents the design of a segmented type synchronous reluctance motor(SynRM) to increase its torque and power factor. The main feature of a segmented type synchronous reluctance motor is the flux barrier. Thus, the design process to find optimum value of various geometric parameters including flux barrier will be explained. Optimum value of each parameter is found where the d, q inductance difference and saliency ratio are maximized because these inductance characteristics are related to torque and power factor. Finite Element Analysis will be used to simulate motor characteristics. Analysis results of redesigned SynRM show higher saliency ratio over 10 and improved value of maximum power factor.

Key Words : Synchronous reluctance, d, q inductance difference, Saliency ratio, Flux barrier

1. 서 론

유도 전동기는 저렴하고 튼튼하며 유지보수가 용이한 점 등 때문에 대부분의 가정용 및 산업용 구동장치로 응용되고 있다. 그러나, 최근에는 고속성, 효율화 등의 측면에서 유도 전동기의 단점을 보완하여 이를 대체할 수 있는 새로운 전동기의 필요성이 증대되고 있다. 근래 국내외적으로 주목을 받고 있는 대표적인 전동기로는 동기형 릴럭턴스 전동기와 스위치드 릴럭턴스 전동기, 영구자석형 동기 전동기 등을 들 수 있다.

그런데, 스위치드 릴럭턴스 전동기는 고정자와 회전자 사이의 자기적인 릴럭턴스의 변화에 의해 발생하는 토크를 이용하는 전동기로서 회전자에 권선이 없는 단순한 구조로 인해 초고속으로 운전이 가능하며 손실이 적게 발생하고 비교적 제어가 용이하다는 장점을 갖고 있다. 그러나, 각 상의 스위칭 시 토크 리플이 발생하고 이에 따른 소음 및 진동이 심하다는 단점이 있어 이를 개선하기 위한 연구가 진행되고 있다[1]. 또한 영구자석형 전동기는 효율과 단위 체적 당 발생 토크 등 제반 특성이 다른 전동기에 비해 우수하지만, 영구자석의 사용으로 인해 제작비용이 증가하고, 착자 문제 등 제작 과정도 쉽지 않다[2].

한편 동기형 릴럭턴스 전동기(Synchronous Reluctance Motor; 이하 SynRM)는 과거 30여 년 동안 저 효율, 저 출력 특성으로 크게 실용화되지 못했으나 최근에는 전력전자 소자

및 회로 기술의 발달과 더불어 단점이 보완되면서 많은 관심을 받고 있다. 일반적인 동기 전동기와는 달리 회전자에 권선이 없어 구조가 간단하므로 초고속 또는 장시간 운전이 필요한 곳에 적합하며 유지 보수가 용이하다는 장점을 갖는다.

SynRM은 성층 방법에 따라 축 방향 성층형과, 횡 방향 성층형으로 분류된다. 축 방향 성층형의 경우, 돌극비는 증가하지만 구조가 복잡하고 축에 회전자 철심을 고정시켜야 되므로 횡 방향 성층형에 비해 제작이 어렵고, 비용이 증가한다. 이에 비해 횡 방향 성층형에 해당하는, 단편형 SynRM은 제작이 비교적 용이하고, 고정자의 슬롯으로 인해 발생하는 토크 리플을 스큐를 이용해 개선시킬 수 있으며, 축 방향 성층 못지 않은 높은 돌극비를 갖도록 설계가 가능하므로 최근 국내외적으로 개발이 활발하다[3].

본 논문에서는 여러 설계 변수들을 고려한 재 설계를 통해 연구실에 보유하고 있는 3상 4극의 220V 400W급 단편형 SynRM보다 좀더 개선된 토크와 역률 특성을 갖는 회전자 설계에 관해 다루고자 한다. 전동기 특성에 영향을 미치는 변수들은 슬롯, 공극, 립, 자속 장벽의 수와 폭 등이다. 미국의 Lipo는 회전자 철심 세그먼트가 차지하는 폭에 대해 전체 자속 장벽영역이 차지하는 폭의 비율 K_w 라 정의하고, 이 K_w 와 슬롯 수에 따른 전동기 특성에 관한 연구 결과를 발표한다[4]. 또한, 일본의 Yukio Honda는 자속 장벽형 SynRM에서 자속 장벽의 개수, K_w , 립이 토크 및 인덕턴스 특성에 미치는 영향에 대한 연구 결과를 발표한 바가 있다[5]. 본 논문에서는 이러한 국내외의 사정을 감안하여 가장 중요한 특성인 토크 및 역률 특성에 슬롯 수 및 슬롯의 개방 폭과 공극, 자속 장벽의 개수 및 폭 등의 기하학적 변수들이 미치는 영향을 알아보고 자속 장벽의 개수 및 폭을 주 설계변수로 하여 돌

* 準 會 員 : 忠南大 電氣工學科 碩士課程

** 正 會 員 : 忠南大 電氣工學科 教授 · 工博

*** 正 會 員 : 忠南大 電氣工學科 博士課程

§ 正 會 員 : 忠北科學大 電氣工學科 教授 · 工博

接受日字 : 2000年 12月 20日

最終完了 : 2001年 6月 11日

극비를 개선시키므로써 고 토크 고 역률 특성을 얻을 수 있는 단편형 SynRM 회전자 구조적인 조건을 도출하였다. 즉, 자속 장벽이 4개, K_w 는 1, 립의 폭이 0.5인 경우 가장 좋은 인덕턴스 특성을 보임을 알 수 있었다. 도출된 회전자 모델은 유한요소 해석한 결과 6[A] 정도까지의 저 전류 영역에서 크게 향상된 인덕턴스 및 역률 특성을 가짐을 확인할 수 있었다.

2. SynRM의 기본 특성식

2.1 d-q 전압 및 토크 특성식

SynRM의 d축, q축 정상상태 전압방정식은 각각 식 (1) 및 식 (2)과 같다.

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

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

여기서, L_{ds} , L_{qs} 는 각각 고정자의 d축 및 q축 인덕턴스, r_s 는 고정자의 상 저항, ω_r 는 회전 속도이다. 전자기 토크를 d, q 축 변수로 표현하면 일반 동기기의 토크 식과 동일한 식 (3)과 같이 나타낼 수 있다.

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

여기서 P 는 극수이다.

I_{ds} 와 I_{qs} 는 그림 1의 벡터도에서 식 (4)와 같이 표현할 수 있다. 식 (4)를 식 (3)에 대입하면 식 (5)와 같은 전자기 토크를 유도할 수 있다.

$$I_{ds} = I_a \cos \phi, \quad I_{qs} = I_a \sin \phi \quad (4)$$

$$T_e = \frac{3}{2} \cdot \frac{P}{2} (L_{ds} - L_{qs}) \cdot \frac{1}{2} \cdot I_a^2 \sin 2\phi \quad (5)$$

SynRM의 토크는 식 (3)과 같이 d, q축 인덕턴스의 차에 비례하고 식 (5)에서 전류 당 토크의 발생 량도 두 인덕턴스의 차에 의해 결정됨을 알 수 있다.

2.2 최대 역률 특성식

SynRM의 단점 중 하나는 저 역률 특성이다. 역률을 개선시키기 위해서는 돌극비를 증가시켜야하는데, 최대 역률과 돌극비 사이에는 식 (6)에서 식 (11)까지의 관계가 성립한다.

역률은 그림 1의 벡터도로부터 식 (6)과 같이 나타낼 수 있다.

$$\cos \phi = \frac{V_{qs} \sin \epsilon + V_{ds} \cos \epsilon}{\sqrt{V_{qs}^2 + V_{ds}^2}} \quad (6)$$

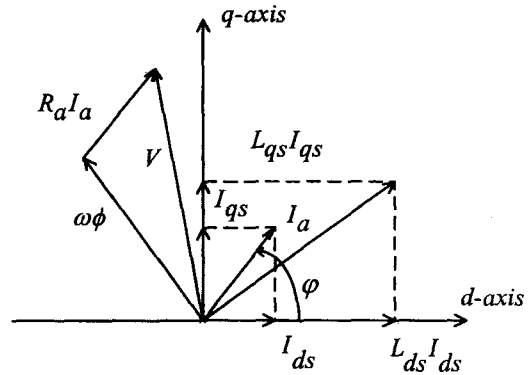


그림 1 SynRM의 벡터도

Fig. 1 Vector diagram corresponding to SynRM

여기서, ϵ 는 mmf 각이다.

식 (6)은 $V_{qs} = \omega_e L_{ds} I_{ds}$, $V_{ds} = -\omega_e L_{qs} I_{qs}$ 의 관계로부터 식 (7)로 다시 표현할 수 있다.

$$\cos \phi = \frac{\omega_e L_{ds} I_{ds} \sin \epsilon - \omega_e L_{qs} I_{qs} \cos \epsilon}{\sqrt{(\omega_e L_{ds} I_{ds})^2 + (\omega_e L_{qs} I_{qs})^2}} \quad (7)$$

여기서, 돌극비(Saliency ratio)를 $S_{ratio} = L_{ds}/L_{qs}$ 라 정의하고 식 (7)을 돌극비의 함수로 정리하면 식 (8)과 같이 나타낼 수 있다.

$$\cos \phi = \frac{(S_{ratio} - 1)}{\sqrt{S_{ratio}^2 \frac{1}{\sin^2 \epsilon} + \frac{1}{\cos^2 \epsilon}}} \quad (8)$$

여기서, $x = \sin^2 \epsilon$ 라 할 때, 최대 역률을 얻기 위해서는 1차 미분 값이 0인 식 (9)의 조건을 만족해야만 한다.

$$\frac{d \cos \phi (S_{ratio})}{dx} = 0 \quad (9)$$

이로부터, 역률이 최대일 조건 식 (10)을 얻을 수 있다.

$$\sin^2 \epsilon = S_{ratio} (1 - \sin^2 \epsilon) = S_{ratio} \cos^2 \epsilon \quad (10)$$

즉, $\tan \epsilon = \sqrt{S_{ratio}}$ 이다.

그러므로, 식 (8)에 식 (10)을 대입하면 최대 역률 특성식인 식 (11)을 얻을 수 있으며, 이로부터 최대 역률이 돌극비 $S_{ratio} = L_d/L_q$ 에 비례함을 알 수 있다.

$$\begin{aligned} \cos \phi_{\max} &= \frac{(S_{ratio} - 1)}{\sqrt{S_{ratio}^2 \frac{1}{1 + S_{ratio}} + \frac{1}{1 + S_{ratio}}}} \quad (11) \\ &= \frac{S_{ratio} - 1}{S_{ratio} + 1} \end{aligned}$$

따라서, 식 (3)과 식 (11)에 의해 토크와 최대 역률에 영향을 미치는 d, q 인덕턴스의 차이와 비율 증가시킴으로써 토크 및 역률 특성을 개선시킬 수 있다. 따라서 고정자 슬롯수와 개방폭, 공극의 길이, 회전자의 자속장벽의 수 및 폭 등의 기하학적인 형상을 적절하게 변화시켜 d, q축 인덕턴스를 변화시켜 특성을 개선하기로 한다.

3. 회전자 설계

3.1 기본모델과 재 설계 시 고려사항

SynRM의 고정자는 유도전동기의 고정자와 구조가 동일하므로 주 설계 대상은 회전자이다. 본 논문은 연구실의 4극 단편형 회전자구조의 SynRM을 기본모델로 하여 개선된 토크 및 역률 특성을 갖는 회전자의 설계에 관해 다룬다[6].

표 1과 그림2는 기본모델의 사양과 단면도를 나타낸 것이다. 그림 2의 립 부분은 회전자의 각 철심 단편들을 이어주는 데, 각 단편들은 절연 층으로 된 자속 장벽으로 분리되어 있다. 따라서, 이런 형태의 동기형 릴럭턴스 전동기를 단편형 동기 릴럭턴스 전동기 혹은 자속 장벽형 동기 릴럭턴스 전동기라 한다.

표 1 기본모델의 사양

Table 1 Specifications of basic model

단편형 동기형 릴럭턴스 전동기	
상수	3
극수	4
슬롯수	36
자속 장벽의 수	3
출력 [W]	400
전압[V]	220
정격속도 [rpm]	1750
1차 저항 [Ω]	2.82
회전자 적층 길이 [mm]	55
공극 [mm]	0.4

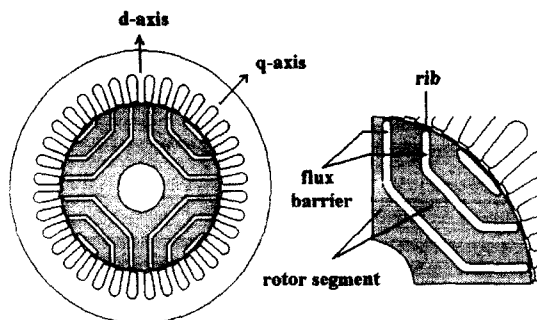


그림 2 단편형 동기형 릴럭턴스 전동기의 단면도
Fig. 2 Cross-section of the segmented type SynRM

SynRM에서 발생하는 토크는 앞장의 식 (3)과 식 (11)에서 보는바와 같이 d축, q축의 인덕턴스 차이와 비에(돌극비)에 영향을 받으므로 고 토크 고 역률 특성을 얻기 위해서는 다음과 같은 조건을 만족해야 한다[7].

- 자화 인덕턴스를 충분히 얻기 위해서 d축 자속은 극의 전체 표면을 따라 흘러야만 한다.
- q축 인덕턴스를 최소화하기 위해 q축 자속은 적게 흘러야만 한다.

3.2 토크 및 역률 특성에 영향을 미치는 설계 변수

단편형 동기 릴럭턴스 전동기의 설계 시 고려할 변수들은 고정자의 슬롯과 공극, 회전자의 립과 자속 장벽이다. d, q축 인덕턴스의 차이와 비율 증가시켜 고 토크·고 역률 특성을 얻기 위해서는 이들 주요 변수들을 설계 파라미터로 하여 최적값을 결정해야만 한다.

(1) 고정자의 슬롯 및 공극의 영향

고정자의 슬롯에서는 누설로 인한 q축 인덕턴스의 증가로 돌극비 S_{ratio} 가 감소한다. 또한, 슬롯의 개방 폭에 따라 누설 자속이 결정되어 L_d, L_q 의 인덕턴스 특성이 달라지므로 이를 고려해야만 한다. 슬롯 수와 개방 폭이 다른 여러 경우를 예로 들어 유한요소 해석을 하였다.

일반적으로 공극은 돌극비 S_{ratio} 를 개선시키기 위해 작게 유지해야 하지만, 제작상의 문제 등으로 제한이 있다. 슬롯의 개수 및 개방 폭과 공극이 인덕턴스 특성에 미치는 영향은 유한요소 해석을 통해 4장에서 고려하겠다. 단, 기본 모델의 고정자는 36슬롯 구조이고 슬롯의 개방 폭은 2.8mm이며 공극은 0.4mm이다.

(2) 회전자 립의 영향

단편형 동기 릴럭턴스 전동기는 단편 구조가 따로 분리되어 있으나 전동기의 제작 시에는 회전자의 기계적인 구조 상 끝 부분이 이어진 형태로 되어있어야 한다. 이러한 부분을 립이라 하는데 회전자의 각 단편들을 기계적으로 고정시키는 역할을 한다. 립 부분은 그림 3과 같이 회전자에 q축 자속이 흐를 수 있는 자로를 형성하고 폭이 넓을수록 누설자속의 영향으로 q축 인덕턴스(L_q)가 증가하게 되므로 가능한 한 폭을 좁게 해야 한다. 따라서, 토크도 립의 폭이 좁은 경우 더 커지는데, 성능이나 기계적 강도를 고려하여 설계 모델의 립은 0.5mm로 선정하였다.

(3) 자속 장벽의 수

q축 자속의 흐름을 제한하기 위해서는 회전자 철심의 자기 포텐셜이 달라야 하고, 이를 위해 절연 층으로 이루어진 자속 장벽을 둔다. 회전자 내 자속 장벽을 적정수로 증가시키면 L_d 는 증가하고 L_q 가 감소하여 단위 전류 당 토크가 증가한다. 그러나, 자속 장벽 수를 일정 개수 이상으로 늘리면 일정

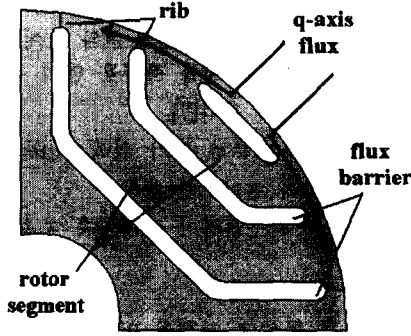


그림 3 립에서의 자속 흐름 경로
Fig. 3 Paths of rib flux

한 회전자 영역 내의 철심 부분이 상대적으로 좁아져 포화가 일어난다. 즉, 돌극비 S_{ratio} 는 더 이상 증가하지 않으며 기계적으로도 견고하지 못한 구조가 된다. 따라서, 본 논문에서는 적정 개수를 정하기 위해 제작 상의 문제(와이어 커팅 등)를 고려하여 3개부터 최대 6개의 자속 장벽을 갖는 여러 모델에 대해 각각의 성능을 비교 검토하였다.

(4) 자속 장벽 폭의 변수 K_w

토크 및 역률 특성에 영향을 미치는 설계 변수들 중 자속 장벽의 개수 외에 전체 철심영역에 대한 전체 자속 장벽 영역 폭의 비인 K_w 를 회전자 재 설계 시 주 설계 변수로서 고려하기로 한다.

자속 장벽의 두께는 d, q인덕턴스의 차와 돌극비 S_{ratio} 가 최대가 되도록 선택해야하는데 K_w 는 식 (12)와 같이 정의한다.

$$K_w = \frac{\sum(W_{air})}{\sum(W_{iron})} \quad (12)$$

$\sum(W_{air})$; 전체 자속 장벽 영역의 폭
 $\sum(W_{iron})$; 전체 철심 영역의 폭

3.3 회전자 설계 과정 및 개선 방안

단편형 동기 릴럭턴스 전동기는 전류가 흐르는 고정자의 권선 부분과, 주 자속이 통과하는 고정자와 회전자의 철심 부분, q축 자속의 흐름을 제한하는 절연 층인 자속 장벽으로 이루어져 있고, 전동기 특성은 이들 구성 요소들에 영향을 받는다.

Vagati가 제안한 방법을 참고로 고정자와 회전자의 제반 설계 변수들을 결정하는 과정을 그림 4에 나타내었다. 설계 과정 중에서 재 설계 모델의 고정자와 회전자의 직경, 공극, 적층길이, 축 등의 사양은 자속 장벽의 개수와 K_w 에 따른 특성 비교를 위해 기본 모델과 동일하므로 주 설계 대상은 회전자이다. 우선 슬롯, 공극, 자속 장벽의 영향을 알아보고 자속 장벽의 개수와 K_w 를 주 설계 변수로 고려하여 개선된 회전자 모델을 얻는다.

4. 유한요소법에 의한 특성 해석

토크와 역률에 영향을 미치는 d, q 인덕턴스의 차와 돌극비 S_{ratio} 를 증가시키기 위한 연구는 수년간 진행되어왔는데 단편형 동기형 릴럭턴스 전동기도 적절한 설계를 통해 축 방향 성층형 SynRM 못지 않은 10이상의 높은 돌극비 S_{ratio} 를 얻을 수 있다.

단편형 동기 릴럭턴스 전동기의 구조적인 특징인 회전자의 립과 자속 장벽을 고려한 설계는 Yukio Honda에 의해 이루어졌고, Lipo는 슬롯 수와 K_w 가 전동기 특성에 미치는 영향에 대해 연구한바가 있으나 횡 방향 성층형 SynRM에 관한 것이었다. 이번 장에서는 3장에서 언급했던 슬롯의 개수와 슬롯의 개방 폭, 공극의 길이, 자속 장벽의 개수 및 K_w 을 고려하여 최적의 토크 및 역률 특성을 갖는 회전자를 얻기 위한 과정을 다루겠다.

4.1 설계 변수에 따른 특성 해석

(1) 슬롯의 수와 개방 폭이 전동기 특성에 미치는 영향

24슬롯과 36슬롯의 두 모델에 대한 해석 결과를 표 2와 그림 5에 나타내었다. 단, 슬롯의 개방 폭과 높이는 기본 모델과 동일하다. 24슬롯 모델의 경우 36슬롯 모델에 비해 치 폭이 넓어져 그림 5와 같이 q축 인덕턴스에는 큰 차이가 없으나 d축 인덕턴스는 더 높은 값을 보인다[8]. 표 2는 1A를 출력주었을 경우 인덕턴스 특성을 나타낸 것이다.

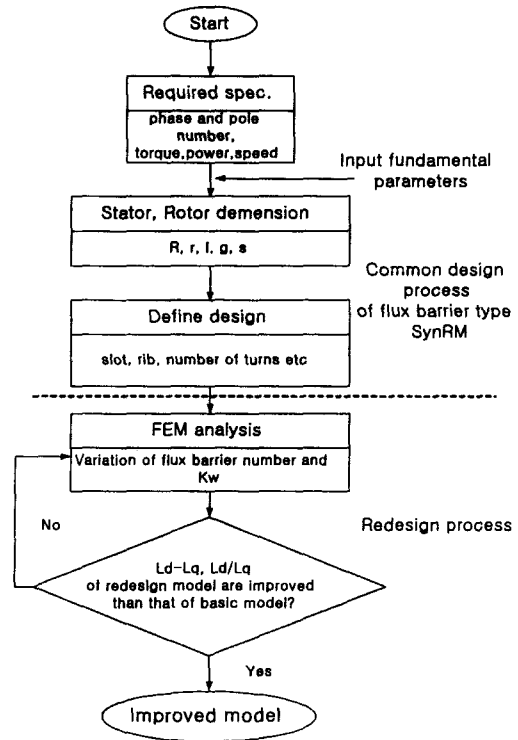


그림 4 설계 순서도
Fig. 4 Flow chart of design process

표 2 슬롯 수에 따른 L_d-L_q , L_d/L_q (1A)
Table 2 L_d-L_q , L_d/L_q with slot number

슬롯 수	L_d-L_q	L_d/L_q
24 슬롯	177.37	6.93
36 슬롯	151.46	6.11

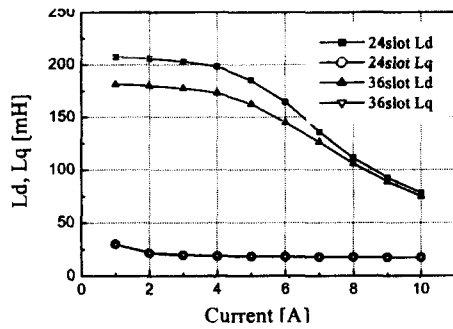


그림 5 슬롯 수를 고려한 전류에 따른 인덕턴스 특성
Fig. 5 Inductance with current considering slot number

24슬롯 모델은 d, q 인덕턴스의 차이보다 더 큰 값을 보이지만 회전자 재 설계가 주목적이므로 개선 모델은 36슬롯의 기본 모델과 동일한 고정자 구조를 갖는다.

다음으로 슬롯의 개방 폭에 따른 특성 해석 결과를 그림 6에서 그림 9에 나타내었다. 단, 기본모델의 슬롯 폭은 2.8mm이다. 그림 6에서 L_d 는 비교적 슬롯의 개방 폭이 넓을수록 감소하고, 그림 7의 q축 인덕턴스의 경우에는 큰 차이가 없다. 이에 따른 그림 8과 그림 9의 인덕턴스의 차이보다 d축 인덕턴스와 q축 인덕턴스의 변화 양상에 따라 슬롯의 개방 폭이 좁을수록 좀 더 나은 특성을 보이고 있다.

따라서, 고정자 축의 설계 변수로서 슬롯의 개수 및 폭을 고려해 본 결과 단편형 동기 릴럭턴스 전동기의 경우 고정자 축은 인덕턴스 특성에 그리 큰 영향은 미치지 않음을 알 수 있다. 재 설계 모델의 슬롯 폭은 기본모델과 동일한 2.8mm로 한다.

(2) 공극의 길이가 전동기 특성에 미치는 영향

공극이 인덕턴스 특성에 미치는 영향을 알아보기 위해 공극의 길이에 따른 해석 결과를 그림 10과 그림 11에 나타내었다. 공극이 작을수록 L_d-L_q 와 L_d/L_q 는 증가하는데 0.2mm의 경우에는 인가 전류가 커짐에 따라 고정자의 치 부분과 회전자 립에서의 포화가 쉽게 일어나 2A 이후 급격히 감소함을 볼 수 있다. 해석 결과 공극은 기본 모델과 동일한 0.4mm에서 가장 양호한 특성을 보인다.

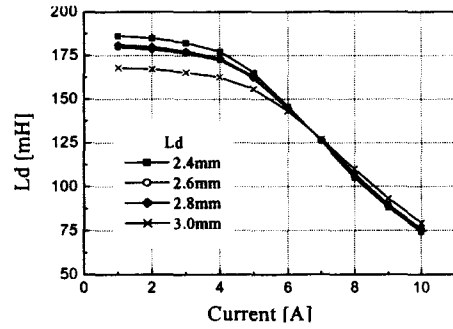


그림 6 슬롯 개방 폭에 따른 d축 인덕턴스 특성
Fig. 6 D-axis inductance with slot open width

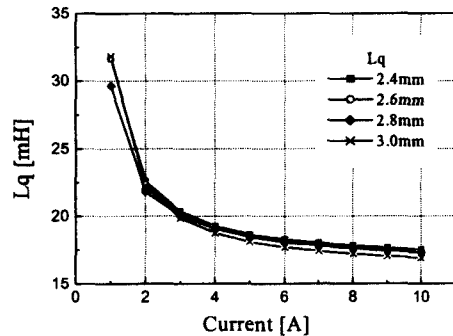


그림 7 슬롯 개방 폭에 따른 q축 인덕턴스 특성
Fig. 7 Q-axis inductance with slot open width

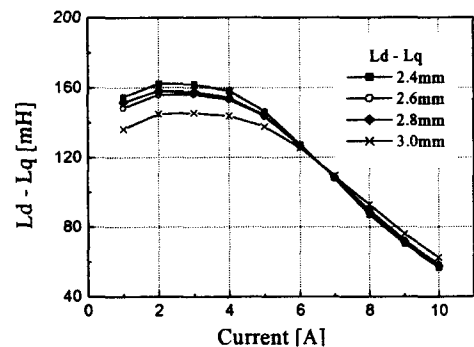


그림 8 슬롯 개방 폭에 따른 d, q 인덕턴스의 차이
Fig. 8 L_d-L_q with slot open width

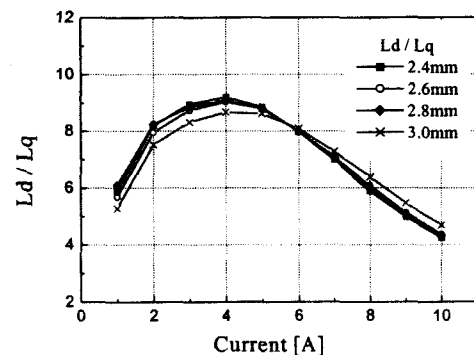


그림 9 슬롯 개방 폭에 따른 d, q 인덕턴스의 비
Fig. 9 L_d/L_q with slot open width

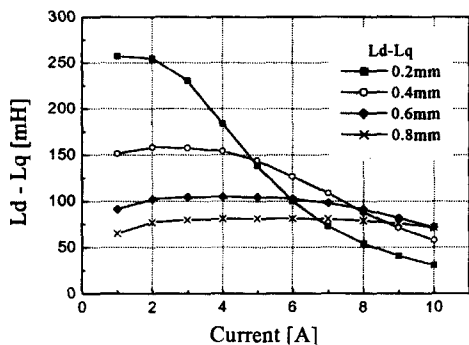


그림 10 공극에 따른 d, q 인덕턴스의 차

Fig. 10 Ld-Lq with air-gap length

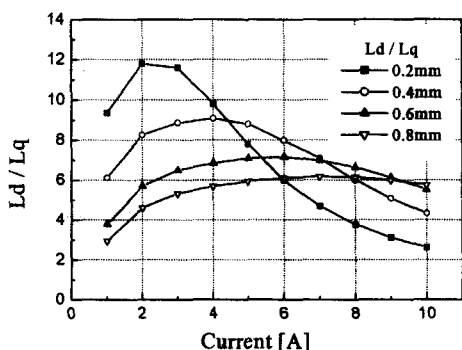


그림 11 공극에 따른 d, q 인덕턴스의 비

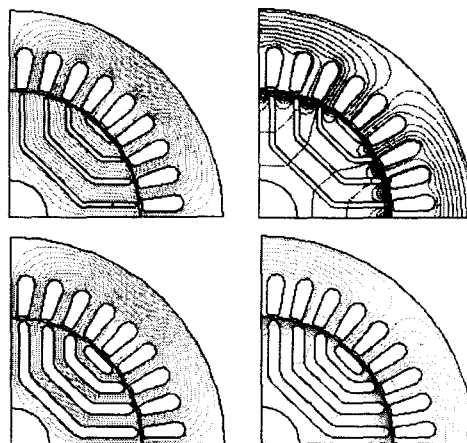
Fig. 11 Ld/Lq with air-gap length

(3) 자속 장벽이 전동기 특성에 미치는 영향

기본모델은 3개의 자속 장벽을 갖는데 q축 인덕턴스를 제한하기 위해 자속 장벽의 수를 최대 6개로 늘려가면서 특성 해석을 하였다.

그림 12는 4개의 자속 장벽을 갖는 회전자 모델의 K_w 를 0.3과 1로 하였을 경우, d q축 자속 분포를 보여준다. 자속 장벽의 개수와 K_w 에 따른 해석 결과는 그림 13과 그림 14에 나타내었다. 그림 13의 인덕턴스의 차는 K_w 가 0.8일 때, 그림 14의 돌극비 S_{ratio} 는 K_w 가 1일 때 가장 높은 값을 보인다. 그림 15과 그림 16은 자속 장벽의 수에 따른 인덕턴스 특성을 나타낸 것이다. 인덕턴스의 차와 비 모두 자속 장벽을 4개 사용한 경우 가장 큰 값을 보인다. 원활한 자속의 흐름을 위해서는 d축 정렬 시 고정자의 치 폭과 회전자 철심 부분의 폭이 일치하는 것이 바람직하는데, 자속 장벽을 5개 사용한 모델의 경우 이들 두 부분이 일치하지 않아 자속 장벽을 4개 사용한 경우보다 오히려 인덕턴스의 차와 비가 감소하였다.

그림 17과 그림 18은 4개의 자속 장벽을 갖는 경우 전류에 따른 인덕턴스 특성을 나타낸 것이다. d q 인덕턴스의 차는 2A에서 최대 값을 보이고 d q축 인덕턴스의 비인 돌극비 S_{ratio} 는 4A에서 최대이다.



(a) K_w 가 0.3일 때의 d, q축 자속 분포

(b) K_w 가 1일 때의 d, q 자속 분포

(a) d, q flux distribution when K_w is 0.3

(b) d, q flux distribution when K_w is 1

그림 12 K_w 가 0.3과 1인 경우 자속 분포

Fig. 12 Flux distribution with $K_w(0.3, 1)$

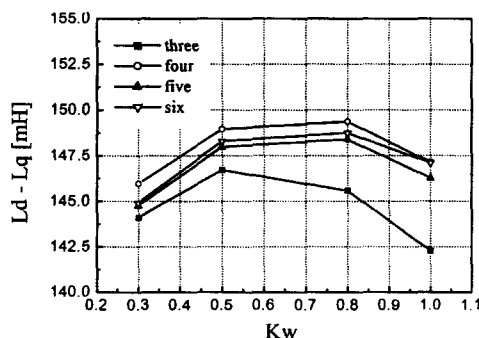


그림 13 K_w 에 따른 인덕턴스의 차

Fig. 13 Inductance difference with K_w

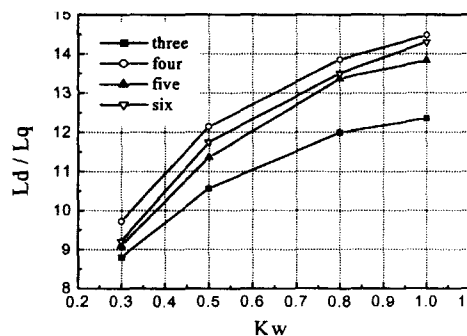


그림 14 K_w 에 따른 인덕턴스의 비

Fig. 14 Inductance ratio with K_w

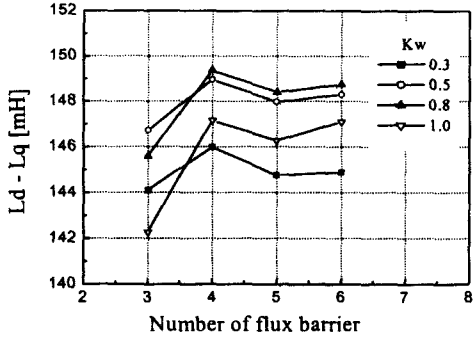


그림 15 자속장벽의 수에 따른 Ld-Lq
Fig. 15 Ld-Lq with flux barrier number

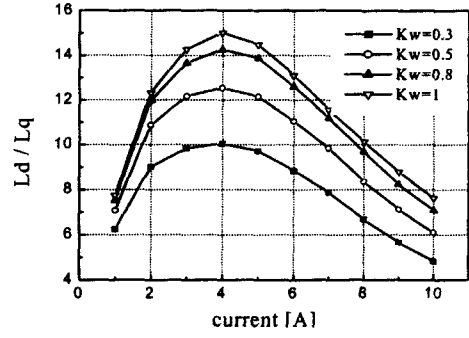


그림 18 전류에 따른 Ld / Lq 특성(4개의 자속장벽)
Fig. 18 Ld / Lq characteristics with current(4 flux barrier)

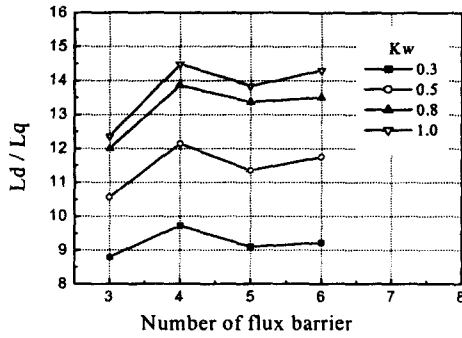


그림 16 자속장벽의 수에 따른 Ld/Lq
Fig. 16. Ld/Lq with flux barrier number

표 3 Ld-Lq 특성(2A)

Table 3 Inductance difference (2A)

자속장벽의 개수	Kw			
	0.3	0.5	0.8	1
3	158.09	161.18	162.76	163.03
4	159.98	163.19	164.43	164.65
5	158.39	162.25	164.23	164.57
6	159.24	163.03	164.54	165.08

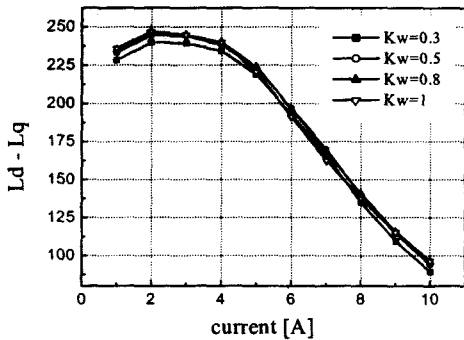


그림 17 전류에 따른 Ld-Lq 특성(4개의 자속장벽)
Fig. 17 Ld-Lq characteristics with current(4 flux barrier)

표 4 Ld/Lq 특성(4A)

Table 4 Saliency ratio (4A)

자속장벽의 개수	Kw			
	0.3	0.5	0.8	1
3	9.07	10.84	12.56	13.10
4	10.04	12.52	14.25	15.01
5	9.44	11.70	13.79	14.01
6	9.58	12.18	14.01	15.00

자속 장벽의 개수가 3, 5, 6인 경우에도 같은 양상을 보인다. 즉, 인덕턴스의 차는 2A에서, 돌극비 S_{ratio} 는 4A에서 가장 큰 값을 갖는다. 그림 17과 그림 18의 결과를 토대로 자속 장벽의 개수가 다른 각 모델의 최대 인덕턴스의 차와 비를 알아보았다. 결과는 표 3과 표 4, 그림 19, 그림 20에 나타내었다. 그림 19와 그림 20에서 $L_d - L_q$, L_d / L_q 의 값 모두 K_w 를 1로 하였을 경우 가장 큰 값을 갖는다.

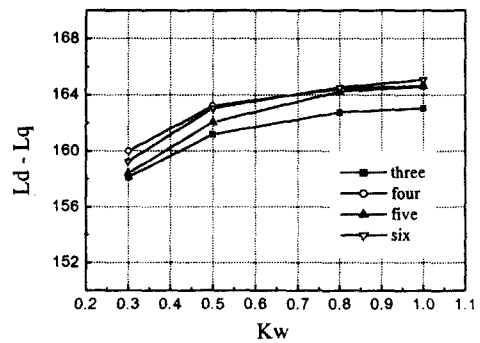


그림 19 Kw에 따른 Ld-Lq 특성(2A)

Fig. 19 Ld-Lq characteristics with Kw(2A)

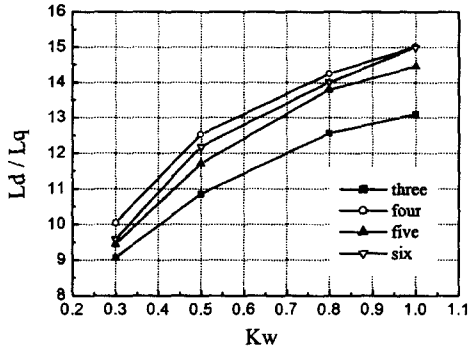


그림 20 Kw에 따른 Ld / Lq 특성(4A)
Fig. 20 Ld / Lq characteristics with Kw(4A)

4.2 개선 모델의 특성해석

자속 장벽의 수와 K_w 를 주 설계 변수로 고려하여 재 설계한 결과 개선된 회전자 모델은 표 5와 그림 21의 사양을 갖는다. 개선된 모델은 4개의 자속 장벽을 가지며 K_w 의 값은 1이다. 그림 21에서 d축 인덕턴스를 증가시키고 회전 시 원심력을 견디도록 중심 부분의 철심 영역 폭을 가장 넓게 설계하였다. 표 6이외의 개선모델 사양은 기본모델과 동일하다.

표 5 기본모델과 개선모델의 변수 비교
Table 5 Design parameters of basic model and improved model

	flux barrier number	Kw	rib width
기본모델	3	0.6	1.1
개선 모델	4	1	0.5

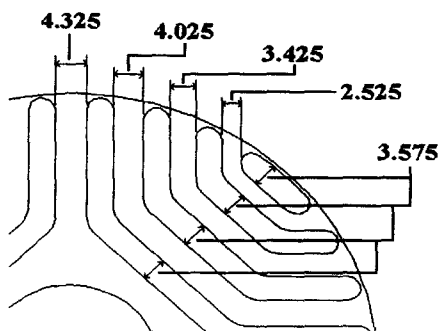


그림 21 자속 장벽의 수 및 폭을 고려하여 재 설계된 모델
Fig. 21 Redesigned model considering flux barrier number and width

4.3 기본모델과 개선 모델의 특성 비교

(1) 자속 분포 특성

기본모델과 개선모델의 d, q축 공극 자속 밀도를 그림 22와 그림 23에 나타내었다. d축 여자 시 고정자와 공극의 사양이 동일하므로 두 모델의 자속 밀도는 거의 일치하지만 q축 여자 시에는 늘어난 자속 장벽의 개수와 폭의 영향으로 개선모델의 자속 흐름이 크게 제한되고 있다.

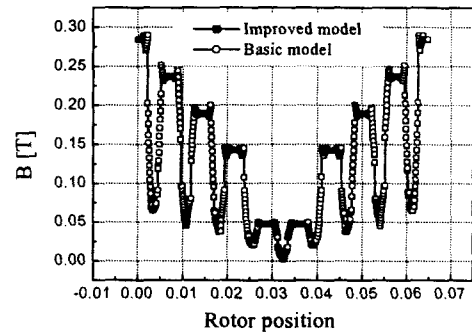


그림 22 기본모델과 개선된 모델의 d축 공극 자속 밀도(1A)
Fig. 22. D-axis airgap flux distribution of basic model and improved model(1A)

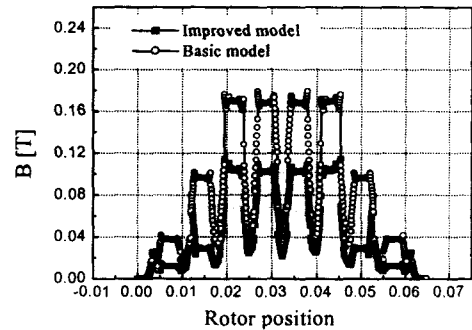


그림 23 기본모델과 개선된 모델의 q축 공극 자속 밀도(1A)
Fig. 23 Q-axis air-gap flux distribution of basic model and improved model(1A)

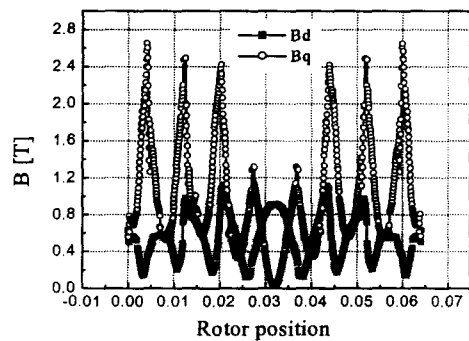


그림 24 개선된 모델의 릿 자속 밀도(2A)
Fig. 24 Rib flux distribution of improved model(2A)

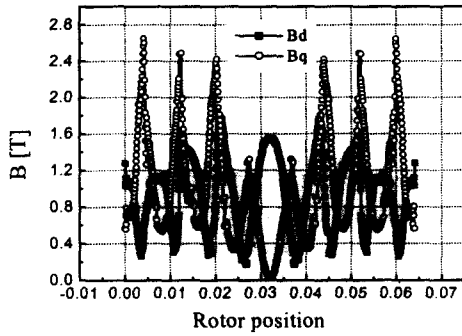


그림 25 개선된 모델의 릿 자속 밀도(4A)
Fig. 25 Rib flux distribution of improved model(4A)

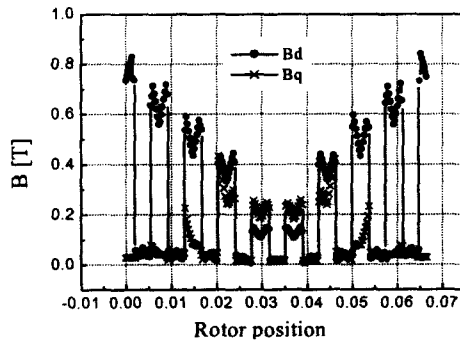


그림 26 개선된 모델의 치 자속 밀도(2A)
Fig. 26 Teeth flux distribution of improved model(2A)

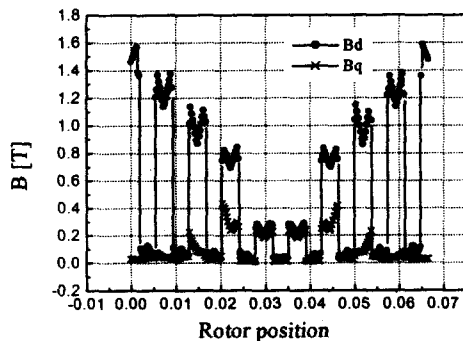


그림 27 개선된 모델의 치 자속 밀도(4A)
Fig. 27 Teeth flux distribution of improved model(4A)

그림 24에서 그림 27까지는 개선 모델의 포화 여부를 알아 보기 위해 그림 17과 그림 18에서 인덕턴스의 차와 비가 최대가 되는 지점, 즉 2A와 4A의 전류를 흘려주었을 때 릿과 치 영역의 자속 밀도 분포를 나타낸 것이다. 전류에 따라 릿과 치에서 d, q축 자속 밀도의 값이 크게 변하는 것으로 보아 그림 17과 그림 18의 결과와 마찬가지로 4A까지는 포화가 크게 발생하지 않음을 확인 할 수 있다.

(2) 토크 및 역률 특성

그림 28과 그림 29는 기본 모델과 개선된 모델의 토크 및 역률 특성을 나타낸 것이다. 그림 28에서 개선 모델의 d, q축

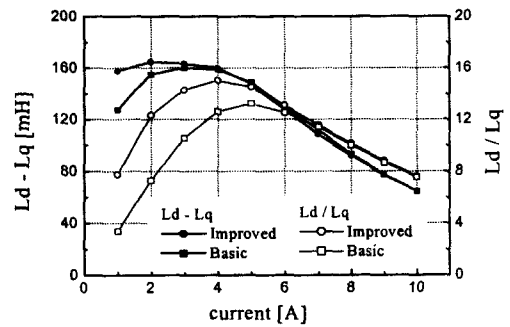


그림 28 기본모델과 개선된 모델의 전류에 따른 Ld-Lq, Ld / Lq 특성
Fig. 28 Ld-Lq, Ld / Lq characteristics of basic model and improved model with current

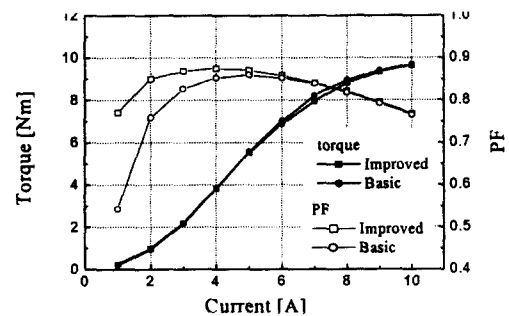


그림 29 기본모델과 개선된 모델의 전류에 따른 토크 및 역률특성
Fig. 29 Torque and power factor of basic model and improved model with current

인덕턴스의 차와 비 모두 전류의 크기가 6[A] 이하의 저 전류일수록 인덕턴스 특성이 개선되었음을 볼 수 있다. 특히 1[A]의 경우 $L_d - L_q$ 특성은 125%, L_d / L_q 인 돌극비 S_{ratio} 특성은 100%이상까지 개선됨을 볼 수 있다. 그림 28의 두 변수에 따라 식 (5)와 식 (11)에 의해 구해지는 개선모델의 토크와 역률을 그림 29에 나타내었다. 그림 29에서 토크와 역률의 뚜렷한 증가를 보일 만큼 인덕턴스 특성이 크게 향상되지는 않았지만 개선 모델의 최대 역률은 1[A]에서 거의 250%까지 향상되었음을 볼 수 있다.

5. 결 론

본 논문에서는 3상 4극 220V, 400W 용량의 단편형 동기 릴럭턴스 전동기의 설계 파라미터와 토크 및 역률 특성에 관하여 다루었다. 토크 및 역률 특성은 고정자의 슬롯 및 공극의 크기, 회전자 릿, 자속 장벽의 수 및 폭에 영향을 받는다. 각각의 파라미터에 의한 인덕턴스 특성 등의 민감도를 검토하여 적절한 값을 선정하였고 이를 바탕으로 한 설계 알고리즘을 작성하여 개선된 특성을 갖는 회전자 모델을 도출하였다. 즉, 자속 장벽의 수는 4개, K_w 는 1이며 rib의 폭이 0.5인 경우 돌극비 S_{ratio} 특성이 가장 좋음을 알 수 있었다. 도출된 회전자 모델의 토크 및 최대 역률 특성을 해석한 결

과 6[A]이하의 범위에서는 저 전류일수록 인덕턴스 및 역률 특성이 현저하게 개선되는 것을 확인하였다. 특히 1[A]의 경우에는 L_d-L_q 특성이 125% 이상, 들극비 $S_{ratio}=L_d/L_q$ 특성은 100% 이상 향상되고, 역률 특성의 경우는 250% 정도 향상되는 것을 확인할 수 있었다. 이로써 본 논문에서 역률 및 토크 특성의 개선을 위한 설계 방법이 타당함을 알 수 있었다. 토크 특성의 개선이 미흡하지만 앞으로 더 정밀하게 분석 검토하여 이를 해결하고자 한다.

참 고 문 헌

[1] A.Vagati, T.A.Lipo, I.Boldea, T.Fukao, L.Malesani, T.J.E.Miller, "Synchronous Reluctance Motors and Drives A New Alternative", IEEE-IAS'94, pp. 1.1-1.3

[2] Heath Hofmann, Seth R.Sanders, "High-Speed Synchronous Reluctance Machine with Minimized Rotor Losses", IEEE Transactions on Industry Applications, vol.36, no.2, pp. 531-539 March April 2000

[3] Alfredo Vagati, Aldo Canova, Mario Chiampi, Michele Pastorelli, Maurizio Repetto "Improved of Synchronous Reluctance Motor Design through Finite-Element Analysis", IEEE Industry Applications Meeting volume 2. pp.862-870, 1999

[4] Takayoshi Matsuo, Thomas A.Lipo, "Rotor Design Optimization of Synchronous Reluctance Machine", IEEE Transaction on Energy Conversion, vol.9, no.2, pp. 359-365, June 1994

[5] Hiroyuki Kiriya, Shinichiro Kawano, Yukio Honda, Toshiro Higaki, "High Performance Synchronous Reluctance Motor with Multi-flux Barrier for the Appliance Industry", IEEE Industry Application vol. 1. pp. 111-117, 1998

[6] Jung Ho Lee, Jung Chul Kim, Dong Seok Hyun, "Effect Analysis of Magnet on L_d and L_q Inductance of Permanent Magnet Assisted Synchronous Reluctance Motor Using Finite Element Method", IEEE Transactions on Magnetics, vol.35, no.3, pp.1199-1202, MAY 1999.

[7] 이중호, "히스테리시스 특성을 고려한 동기형 릴럭턴스 전동기의 특성해석" 한양대 대학원 박사학위논문 1999, pp.6

[8] 이중호, 현동석 "유한요소법을 이용한 단편형 회전자 구조 동기형 릴럭턴스 전동기의 특성 해석", 전기학회논문지 8호 제 47권 pp.1116-1122, 1998. 08

저 자 소 개



장 석 명 (張錫明)

1949년 7월 3일 생. 1976년 한양대 전기공학과 졸업. 1978년 동 대학원 졸업. 1986년 한양대 대학원 박사과정 졸업 (공박). 1989-1990년 미국 Univ. of Kentucky(방문연구). 1978년~현재 충남대 전기공학과 교수, 현재 당학회 평의원, 편집이사, 편집위원장, 전기기기 및 에너지 변환 시스템 부문회 부회장 및 편집위원장.

Tel : 042-821-5658

E-mail : smjang@ee.cnu.ac.kr



박 병 임 (朴炳任)

1977년 1월 13일생. 1999년 충남대 전기공학과 졸업. 2001년 동 대학원 전기공학과 졸업(석사). 2001년-현재 (주)모터넷 연구원.

Tel. : 032-621-2800

E-mail : dewy95@motor-net.co.kr



이 성 호 (李成浩)

1971년 11월 1일 생. 1997년 충남대 전기공학과 졸업. 1999년 동 대학원 졸업. 1999년~현재 충남대 대학원 박사과정

Tel : 042-821-7608

E-mail : shlee@ruru.ee.cnu.ac.kr



이 중 호 (李重浩)

1968년 8월 21일 생. 1993년 한양대 공대 전기공학과 졸업, 1995년 동 대학원 전기공학과 졸업(석사). 1999년 동 대학원 전기공학과 졸업(공박). 1999년 9월-2000년 2월 한양대학교 부설 산업과학연구소 선임연구원. 2000년 3월-현재 도립 충북과학대학 전기공학과 전임강사.

Tel : 043-730-6323

E-mail : limotor@unitel.co.kr