

가전용 340W급 동기형 릴럭턴스 전동기 설계 및 효율특성 실험

論 文

52B-2-1

Design and Efficiency Characteristic Test of 340W Home Appliance Synchronous Reluctance Motor

李 重 浩
(Jung Ho Lee)

Abstract - This paper deals with an automatic design procedure for the maximum torque density and power factor in a synchronous reluctance motor (SynRM). The focus of this paper is the design relative to the number of flux barrier and the ratio Kw of flux barrier width to iron sheet width of a SynRM under the mechanical constraint.

The Finite Elements Analysis (FEA) has been used to evaluate the maximum torque density and power factor with each rotor shape. The proposed procedure allows to define the rotor geometric dimensions starting from an existing rotor or a preliminary design. The maximum torque density and power factor of a SynRM has been resulted with the rotor design variation. To prove the propriety of the designed SynRM, the Digital Signal Processor (DSP) installed experimental devices are equipped and the efficiency characteristic test is performed.

Key Words : 동기형 릴럭턴스 전동기, 유한요소법, 자동선처리(automatic pre-processor), 돌극비, 효율특성실험

1. 서 론

가전용 및 산업용 전동기의 대부분은 유도 전동기이지만, 특정 응용 분야에서는 이를 대체할 새로운 전동기의 필요성이 증대되고 있다. 특히, 최근에 인버터가 저가화 되면서 가전용 전동기의 적용이 가능하게 되어 가변속 전동기에 대한 연구에 한층 박차를 가하게 되었다.

이중 한 방안으로 영구자석이 없으며, 소음면에서도 스위치 릴럭턴스 전동기(SRM)보다 유리한 동기형 릴럭턴스 전동기(SynRM)가 각광을 받고 연구되고 있다. SynRM의 회전자는 권선이 없는 간단한 구조이므로 고장이 적어 신뢰도가 높아서 장시간 운전이 필요한 곳에 적합하며 유지 보수가 용이하다. 또한 영구자석 형 전동기와는 달리 고 강도, 저 비용의 재질을 사용한 회전자 제작이 가능하며, 유도전동기에 비해 회전자에 발생하는 손실이 적어 기동과 정지가 빈번한 경우에 유리하므로 최근 국내외적으로 개발이 활발하다 [1]-[11].

본 연구에서는, 340W급 가전용 SynRM의 돌극비를 개선하기 위해서 토크 및 역률 특성에 영향을 미치는 슬롯, 공기, 자속 장벽 등의 여러 설계 변수를 고려하여 인덕턴스 특성을 개선함으로써 고 토크 고 역률 특성을 얻을 수 있는 회전자 설계를 수행하였다. 설계시 회전자 전체자속장벽의 폭에 대한 전체철심부분의 비 K_w 및 자속장벽수의 변화에 따르는 변형된 회전자의 형상을 해석할 때, 유한 요소 해석을 위한 선

처리 작업을 다수 수행해야하는 번거로움이 따른다. 본 연구에서는 자동으로 형상변화에 따르는 CAD화일을 작성하고 선처리 작업을 하는 프로그램을 설계 프로그램에 포함하여 설계시간을 단축하였다.

또한, 설계된 전동기를 제작하고 효율을 측정하기 위해 DSP가 내장된 인버터와 부하장치, 토크미터 등으로 시스템을 구성하여, 각 부하별, 전류각별로 효율을 측정하여 동기형 릴럭턴스 전동기의 우수성 및 산업 적용가능성을 확인하였다.

2. 동기형 릴럭턴스 전동기(SynRM)의 특성

2.1 d-q 전압 및 토크 특성

본 연구에 있어 동기형 릴럭턴스 전동기(Synchronous Reluctance Motor; SynRM)의 정현파 회전자계로 구동되므로 고정자는 유도전동기의 고정자와 구조가 같으며, 고정자 권선은 공심 집중권으로 시행되고 회전자는 극당 3개의 자속장벽을 가지고 있다.

그림 2.1은 본 연구에서 다루고자 하는 단편형 동기 릴럭턴스 전동기의 단면을 나타내고 있다.

SynRM의 특성해석을 d축 q축 정상상태 전압 특성 식은 식(1), (2)와 같이 모델링 할 수 있다.

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

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

여기서, L_{ds} , L_{qs} 는 고정자의 d축 및 q축 인덕턴스, r_s 는 고정자의 상 저항, ω_r 는 회전 속도이다.

正 會 員 : 한밭大學 電氣工學科 전임강사 · 工博

接受日字 : 2002年 4月 26日

最終完了 : 2002年 1月 7日

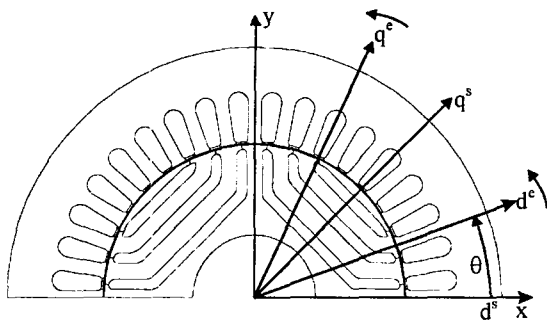


그림 2.1 입력전류와 회전자와의 관계
Fig. 2.1 The relation between input current and rotor

전자기 토크를 d, q축 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 P는 극 수이다.

식(3)에서 보는 바와같이 SynRM의 토크는 회전자가 회전하는 공극자속과 일치하려고 하는 힘으로 회전자는 릴럭턴스가 최소가 되는 자속경로를 유지하면서 공극자속의 회전속도와 동일하게 회전하게 된다.

i_{ds} 와 i_{qs} 는 그림 2.2의 벡터도에 의해 식 (4)와 같이 표현할 수 있으며, 식 (4)를 식 (3)에 각각 대입하면 식 (5)와 같은 전자기 토크를 유도할 수 있다.

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

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

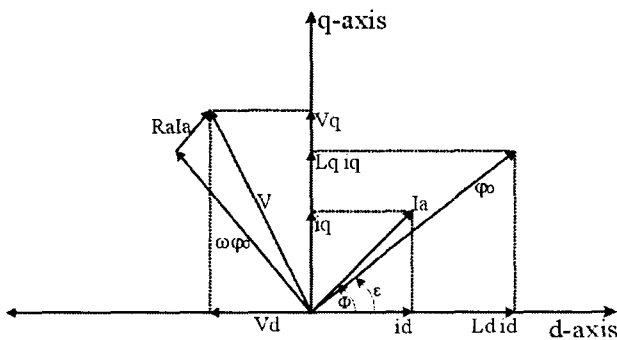


그림 2.2 동기 릴럭턴스 전동기의 벡터도
Fig. 2.2 Vector diagram corresponding to SynRM

SynRM의 토크는 식 (3)에서 알 수 있듯이 d, q축 인덕턴스의 차 ($L_{ds} - L_{qs}$)에 비례한다. 또한, 식 (5)에서 전류 당 토크의 발생 량도 두 인덕턴스의 차에 의해 결정된다.

따라서 이상적인 전동기에서는 $\phi = 45^\circ$ 에서 단위전류당 최대토크가 발생하게 되며 그 회전자는 릴럭턴스가 최소가 되는 자속경로를 유지하면서 공극 자속의 회전속도와 동일하게 회전하게 된다.

2.2 최대 역률 특성

SynRM의 단점으로 빈번하게 논의되는 것중의 하나는 저역률(poor power factor) 특성이다. 이러한 SynRM의 최대역률특성 $\cos \phi_{max}$ 는 그림 2.2의 벡터도로부터 식 (6)과 같이 나타낼 수 있다.

$$\cos \phi_{max} = \left(\frac{\frac{L_d}{L_q} - 1}{\frac{L_d}{L_q} + 1} \right) \quad (7)$$

따라서, 회전자 설계 시 식 (3)과 식 (6)의 토크와 최대역률에 영향을 미치는 변수인 d, q 인덕턴스의 차와 비를 증가시킴으로써 토크 및 역률 특성을 개선시킬 수 있음을 알 수 있다.

2.3 SynRM의 회전자 설계

2.3.1. 설계 모델과 설계 시 고려사항

SynRM의 고정자는 유도전동기의 고정자와 구조가 동일하므로 주 설계 대상은 회전자이다. 본 연구에서는 시작기인 4극 단편형 SynRM의 토크 및 역률 특성을 개선시키기 위한 설계과정을 다루겠다.

다시 말해서 SynRM의 주요 설계 목표는 동일급 유도전동기의 대치가능성에 초점이 맞추어진다. 따라서 정격출력, 정격 rpm, 정격전압 등은 미리 정해지는 양이며, 설계자가 건드릴 수 있는 요소는 부하에 따르는 정격출력을 내는데 필요한 고정자의 전류밀도 및 특히 회전자구조에 따르는 d, q 인덕턴스 정도이다.

회전자의 설계는 식(3)에서 나타난 바와 같이 토크에 중요한 영향을 미치는 요소인 d축과 q축 인덕턴스 비 (L_d/L_q)와 차 ($L_d - L_q$)를 기준으로 시행되었다. 표 2.1은 본 연구의 대상인 기본모델의 기본 사양이다.

표 2.1 기본 모델의 사양
Table 2.1 Specification of the test machine

단편형 동기 릴럭턴스 전동기	
상수	3
극수	4
출력 [W]	340 [W]
속도 [rpm]	3600[rpm]
1차 저항 [Ω]	0.784 [Ω]
권선	공심 집중권
슬롯	24개
회전자 적층 길이[mm]	77 [mm]
공극 [mm]	0.4 [mm]

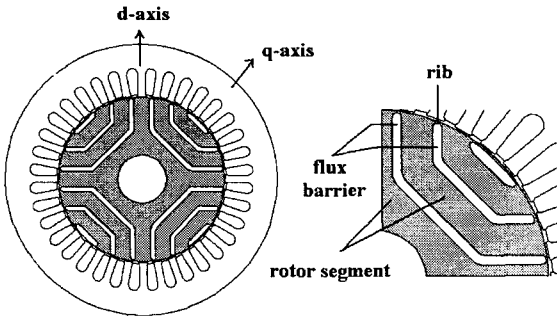


그림 2.3 일반 단편형 동기 릴럭턴스 전동기의 단면도
Fig. 2.3 A cross section of the segmented type SynRM

그림 2.3은 일반적 단편형 동기형 릴럭턴스전동기의 단면도를 보여준다.

단편형 동기형 릴럭턴스 전동기 설계 시 고려할 변수를 다 정리해 본다[11].

- 가. 고정자의 슬롯 및 공극의 영향
- 나. 회전자 릿(Rib)의 영향
- 다. 자속 장벽의 수
- 라. 자속 장벽 폭의 변수(K_w)

$$K_w = \frac{\sum(W_{air})}{\sum(W_{iron})} \quad (8)$$

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

여기서 자속장벽 폭의 변수는 일반적으로 0.5가 최대 돌극비를 나타낸다고 문헌에서 언급하고 있다.[13][14] 그러나 문헌 [13]은 축대칭형(axially laminated type)에 관한 언급이고, 문헌[14] 또한 자속장벽이 6개인 경우에 대한 언급이었다. 자속장벽의 수가 높으면 높을수록 돌극비가 상승되는 것이 일반적이지만, 자속장벽의 폭의 변수 K_w 는 자속장벽의 수가 많을수록 0.5이상이 되면 포화가 일어나기 때문에 돌극비가 오히려 감소하는 현상이 있어 보통 0.5에서 최적값이 나온다. 따라서 0.5라는 값은 설계 상황에 따르는 값이며, 절대적인 설계값이 될 수 없는 요소이다.

3. 지배방정식 유도 및 정식화

3.1 정특성 해석시의 정식화

변위전류를 무시할 수 있는 준정상상태에서, 동기형 릴럭턴스 모터의 와전류는 무시된다는 가정하에 자기 벡터 포텐셜 \vec{A} 로 표현 되는 지배 방정식은 다음과 같이 유도된다. 이를 위한 Maxwell 방정식은 다음과 같다.

$$\nabla \times \vec{H} = \vec{J}_o \quad (9)$$

$$\nabla \cdot \vec{B} = 0 \quad (10)$$

$$\vec{B} = \mu_0 \vec{H} \quad (11)$$

여기서, \vec{H} : 자계의 세기

\vec{E} : 전계의 세기

\vec{B} : 자속밀도

\vec{J}_o : 인가 전류밀도

μ_0 : 공기의 투자율

위식에 자속밀도와 자기벡터 포텐셜과의 관계 $\vec{B} = \nabla \times \vec{A}$ 를 도입하면 다음과 같은 유한요소 해석을 위한 지배방정식을 구할 수 있다.

$$\nabla \times \left(\frac{1}{\mu_0} \nabla \times \vec{A} \right) = \vec{J}_o \quad (12)$$

해석영역에 유한 요소법을 적용하기 위하여 전체 영역을 n개의 1차 삼각형 요소로 분할하고, 각각의 삼각요소 내에서의 자기벡터 포텐셜은 선형적으로 변한다고 가정하면 요소 내에서의 근사값 $A^{(e)}$ 는 다음과 같이 된다.

$$A^{(e)} = \sum_{i=1}^3 N_{ie}(x, y) A_{ie} \quad (13)$$

식(17)에서 N_{ie} 는 요소형상함수이며, 2차원 평면에 대해 식(18)과 같이 좌표의 함수로 표현된다.

$$N_{ie}(x, y) = \frac{1}{2\Delta^{(e)}} (b_{ie} + c_{ie}x + d_{ie}y) \quad (14)$$

여기서 $\Delta^{(e)}$ 는 삼각형 요소의 면적 b_{ie}, c_{ie}, d_{ie} 는 각각 다음과 같다.

$$b_{ie} = x_{je}y_{ke} - x_{ke}y_{je}$$

$$c_{ie} = y_{je} - y_{ke}$$

$$d_{ie} = x_{ke} - x_{je} \quad (i, j, k \text{ 는 순환수})$$

요소 내에서 근사함수 $A^{(e)}$ 를 식(12)에 대입하고 가중 잔차법의 하나인 Galerkin법을 적용하여 각 요소에 대하여 정식화하면 잔차 I_{ie} 는 식(15)와 같이된다.

$$I_{ie} = \int_{S^e} \frac{1}{\mu} \sum_{i=1}^3 \left(\frac{\partial N_{ie}}{\partial x} \frac{\partial N_{je}}{\partial x} + \frac{\partial N_{ie}}{\partial y} \frac{\partial N_{je}}{\partial y} \right) A_{ie} dx dy - \int_{S^e} J_0^e N_{ie} dx dy \quad (15)$$

식(15)를 행렬로 나타내면 식(16)과 같으며 요소행렬의 계수값들은 식(17), (18)와 같다.

$$[K^{(e)}] \{A^{(e)}\} + \{F^{(e)}\} = 0 \quad (16)$$

$$K_{ij}^{(e)} = \frac{1}{4\Delta^{(e)}} \frac{1}{\mu_0} (c_{ie}c_{je} + d_{ie}d_{je}) \quad (17)$$

$$F_i^{(e)} = -\Delta^{(e)} \frac{N_i}{3S} \quad (18)$$

요소 (e)에서 식(16)과 같이 표현 되는 요소 방정식을 전체

해석영역에 대하여 이를 적용하여 결합하면 식(19)과 같은 계 행렬방정식을 구할 수 있다.

$$[K]\{A\} + \{F\} = 0 \tag{19}$$

여기서, [K]는 계수 행렬이며, {F}는 구동 행렬이다.

본 논문에서는 정특성 해석을 위하여 전류원 해석을 시행하였으며, 전류 입력은 다음과 같다.

$$i_d^e = x[A] \quad i_q^e = 0[A] \tag{20}$$

$$i_d^s = i_d^e \cdot \cos(\theta + \tau) + i_q^e \cdot \sin(\theta + \tau)$$

$$i_q^s = -i_d^e \cdot \sin(\theta + \tau) + i_q^e \cdot \cos(\theta + \tau) \tag{21}$$

$$i_a^s = i_d^s$$

$$i_b^s = -i_d^s/2 - \sqrt{3}/2 \cdot i_q^s \tag{22}$$

$$i_c^s = -i_d^s/2 + \sqrt{3}/2 \cdot i_q^s$$

여기서, i_d^e, i_q^e : d, q회전좌표축 전류, i_d^s, i_q^s 는 텐서(tensor)변환 후의 d, q 고정좌표축 전류, i_a^s, i_b^s, i_c^s 는 2상에서 3상 변환 후의 3상 고정좌표축 전류이다.

따라서, i_d^e 에 d축 전류값을 주고, i_q^e 을 0으로 하면, d축에 기자력이 인가되며, i_q^e 에 q축 전류값을 주고, i_d^e 을 0으로 하면, q축에 기자력이 인가된다. 그러므로 위와 같은 방법으로 전류를 인가하면, 각축의 회로정수가 기기의 특성을 결정짓는 돌극형 전력 변환기기의 전류원 해석이 편리하게 된다.

3.2 인덕턴스 계산

SynRM의 경우 파라미터 중예성 인덕턴스의 값이 전류, 토크, 역률등의 특성을 결정하는 중요한 요소가 된다. 본 연구에서 정확한 인덕턴스의 값을 추출하기 위해 시행한 유한요소해석에서 각상의 자속을 구하는 식은 다음과 같다.

$$\lambda = N \int B \cdot dS = N(A_1 - A_2)L_c \tag{23}$$

여기서, L_c 는 1차축 적층폭, N 은 코일 턴수, A_1, A_2 은 슬롯에서의 자기벡터 포텐셜이다.

식 (23)을 이용하여 각 상에서의 쇄교자속을 구한 후 텐서(tensor) 변환을 이용하여, 각각 d축과 q축의 자속을 계산한다. 마찬가지로, 전류도 텐서(tensor)변환을 이용하여 d, q축 성분을 계산한 후, 인덕턴스를 계산하면 다음과 같다.

$$L_d = \frac{\lambda_d}{I_d}, \quad L_q = \frac{\lambda_q}{I_q} \tag{24}$$

입력전류의 증가에 따른 d, q축 인덕턴스 성분의 변화폭 선은 d축으로의 전류인가시 q축 전류는 영(zero)이며, q축으로의 전류인가시도 d축 전류는 영(zero)이다. 따라서, 상호간섭의 영향은 무시한다.

4. 설계 변수를 고려한 회전자 설계

일반적으로 회전자의 단편수가 증가할수록 위의 조건을 만족하는 회전자를 설계할수 있지만, 회전자축(Shaft), Reveting hole 등의 기계적 구조 때문에 제한을 받게 된다.

설계 목표 모델은 돌극비 개선을 위해 제작상의 한계를 고려하여 자속 장벽의 개수는 3개와 4개를 사용한 두 경우로 하였고, K_w 는 회전자의 철심 폭과 자속장벽의 비를 0.3에서 1 사이를 기준으로 여러 가지 값에 대하여 해석을 시행하였다. 비선형 해석에 의한 자기포화 현상을 고려하기 위하여 자기회전자의 철심재료로는 기본모델과 동일한 S40의 B-H특성곡선을 사용하여 자기포화를 고려하였고, 자속 장벽은 공기영역으로 하여 해석을 시행하였다.



(a) 3 Flux barrier model (b) 4 Flux barrier model

그림 4.1 자속장벽개수에 따른 SynRM 시작기 모델

Fig. 4.1 Test Machine of SynRM for flux barrier number

그림 4. 2는 설계 흐름도를 보여준다.

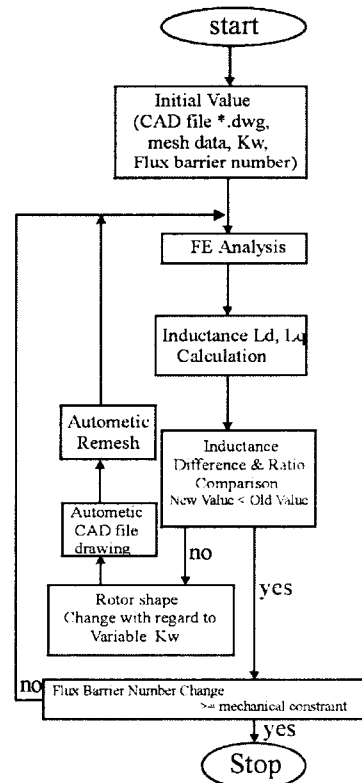


그림 4.2 설계 흐름도

Fig. 4.2 Flow chart of design process

그림 4.2의 설계흐름도를 이용한 시행순서는 다음과 같다.

- (c) Initial Value : 초기 시작기의 CAD 파일 선처리(Pre-processor) 작업 데이터를 작성한다.
- (d) Finite Element Analysis : 상기 기술된 유한요소법으로 전류입력 1[A]~10[A]까지에 대하여 d축 및 q축 자속선도 및 전류에 따른 정특성 해석을 수행한다.
- (e) Calculation of Inductance L_d and L_q : 각각의 전류에 대하여 3.2절에 기술된 방법을 이용하여 d축 및 q축 인덕턴스를 계산한다.
- (f) Computation of Inductance Ratio/Difference and Comparison: 인덕턴스 비와 차를 계산한 후 이전 모델과 비교, 최적 모델을 찾는다.
- (g) Automatic CAD File Drawing & Pre-processor for FEA : K_w 의 변화에 따르는 변화된 회전자의 형상을 해석할때, 유한 요소 해석을 위한 선처리 작업을 다수 수행해야 하는 번거로움이 따른다. 본 연구에서는 자동으로 형상변화에 따르는 CAD화일을 작성하고 선처리 작업을 하는 프로그램을 설계 프로그램에 포함하여 설계시간을 단축한다.

이와같은 흐름도에 의하여 3개 및 4개의 자속장벽을 갖는 synRM의 시작모델을 기준으로 하여 회전자 철심 세그먼트가 차지하는 폭에 대해 전체 자속장벽의 영역이 차지하는 폭 비(K_w)를 변화시켜가면서 그 특성을 고찰하였다.

5. 설계 결과

5.1절과 5.2절에서는 자속장벽 3, 4의 경우 그리고 각각 K_w 가 0.3, 0.5, 0.8, 1인 경우에 대하여 그때의 d축 및 q축 자속선도 및 전류에 따른 인덕턴스의 특성을 나타내었다.

자속장벽 3인 경우에 있어서 $K_w=1$, 2A에서 인덕턴스 차 최대 190.43mH, 3A에서 인덕턴스 비 최대 9.55가 보였으며, 자속장벽 4인 경우에 있어서 $K_w=1$, 2A에서 인덕턴스 차 90.78mH, 3A에서 인덕턴스 비 9.96을 보였다. 토크는 각각 $K_w=1$ 에서 최고치를 나타냈으며, 자속 장벽 4가 3보다 우수하게 나타났다. 여기서 중요한 결과는 기존 문헌의 $K_w=0.5$ 와 다른 결과가 나왔다는 것이다. K_w 값은 자속장벽의 수와 이에 따르는 포화현상과 밀접한 관계를 가지므로 설계상황에 따라 변화하는 값이다.

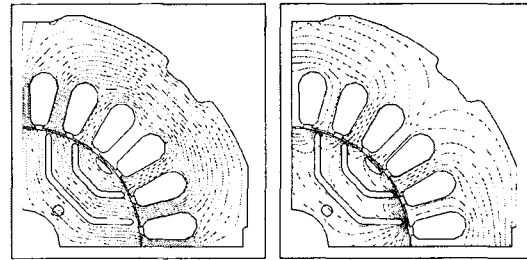
또한 해석을 통한 최대 설계치를 제작에 적용할 수는 없다. 리벳팅 (reveting) 문제 와이어 커팅 문제 등 공장의 제조 능력에 따라 설계 사양은 달라질 수 있다.

본 연구는 위의 제조 여건을 고려한 최대값인 자속장벽 3, $K_w=0.8$ 을 시작으로 제작하였으며, 효율측정 실험을 통해서 동기형 릴럭턴스 전동기의 우수성을 확인하였다.

5.1. 자속 장벽을 3개 사용한 경우

본 연구결과에서는 K_w 가 0.3, 0.5, 0.8, 1인 경우에 대하여 그때의 d축 및 q축 자속선도 및 전류에 따른 인덕턴스의 특성을 나타내었다.

1) K_w 가 0.3일 때 특성해석 결과 (3 Flux-barrier Model)



(a) d축 자속선도 (b) q축 자속선도

그림 5.1 K_w 가 0.3일 때 d, q축 자속선도

Fig. 5.1 d, q flux distribution of SynRM with $K_w(0.3)$

표 5.1 전류에 따른 인덕턴스 특성 ($K_w=0.3$)

Table 5.1 Inductance characteristics according to Current ($K_w=0.3$)

current	L_d	L_q	$L_d - L_q$	L_d/L_q
1	218.62	47.93	170.69	4.56
2	217.15	44.49	172.66	4.88
3	213.50	37.84	175.66	5.64
4	201.24	34.96	166.28	5.76
5	178.86	33.29	145.57	5.37
6	155.25	32.12	123.13	4.83
7	127.69	31.22	96.47	4.09
8	107.75	30.47	77.53	3.54
9	90.69	29.75	60.94	3.05
10	76.48	29.05	47.43	2.63

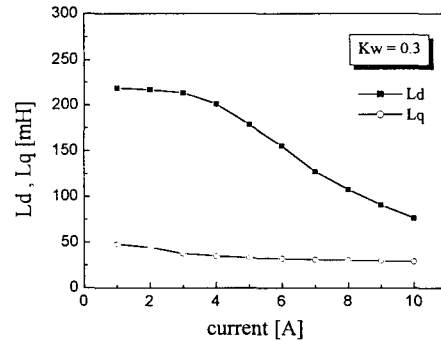


그림 5.2 전류에 따른 인덕턴스 특성 ($K_w=0.3$)

Fig. 5.2 Inductances according to Current ($K_w=0.3$)

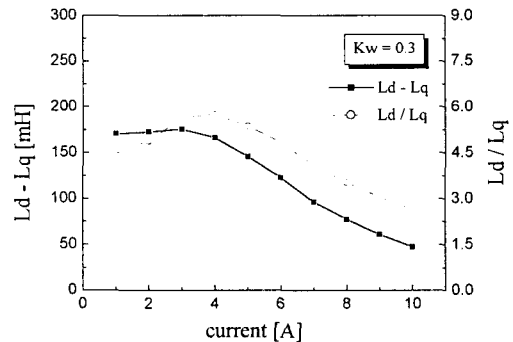


그림 5.3 전류에 따른 인덕턴스 차와 비 ($K_w=0.3$)

Fig 5.3 Inductances ratio and difference according to Current ($K_w=0.3$)

2) K_w 가 0.5일 때 특성해석 결과 (3 Flux-barrier Model)

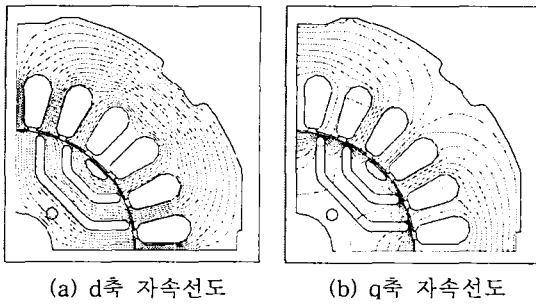


그림 5.4 K_w 가 0.5일 때 d, q축 자속선도

Fig. 5.4 d, q flux distribution of SynRM with Kw(0.5)

표. 5.2 전류에 따른 인덕턴스 특성 ($K_w=0.5$)

Table 5.2 Inductance characteristics according to current ($K_w=0.5$)

current	L_d	L_q	$L_d - L_q$	L_d/L_q
1	218.51	40.60	177.91	5.38
2	216.98	32.64	184.34	6.65
3	212.95	28.47	184.48	7.48
4	200.79	26.76	174.03	7.50
5	178.49	25.76	152.73	6.93
6	154.68	24.88	129.80	6.22
7	127.17	24.14	103.03	5.27
8	107.26	23.56	83.7	4.55
9	90.57	23.08	67.49	3.92
10	76.50	22.64	53.86	3.38

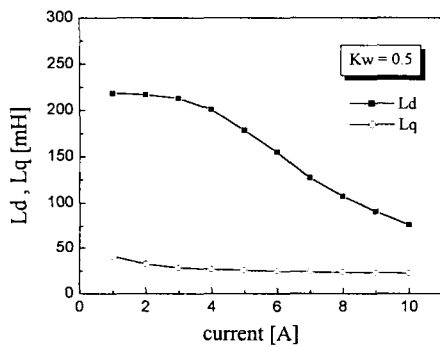


그림 5.5 전류에 따른 인덕턴스 특성 ($K_w=0.5$)

Fig. 5.5 Inductance according to current ($K_w=0.5$)

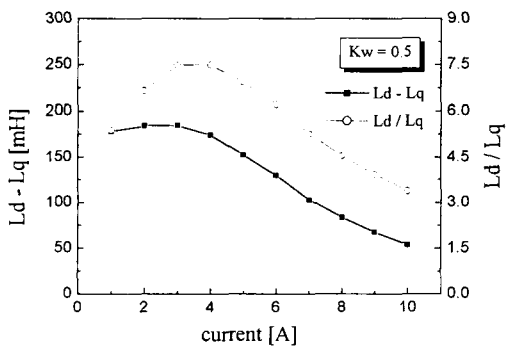
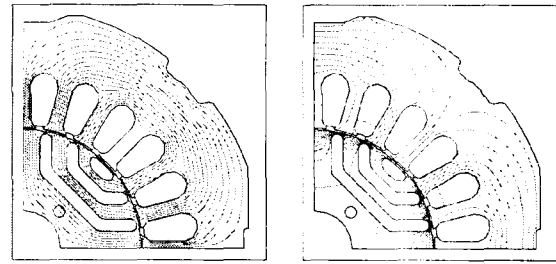


그림 5.6 전류에 따른 인덕턴스 차와 비 ($K_w=0.5$)

Fig. 5.6 Inductances ratio and difference according to Current ($K_w=0.5$)

3) K_w 가 0.8일 때 특성해석 결과 (3 Flux-barrier Model)



(a) d축 자속선도

(b) q축 자속선도

그림 5.7 K_w 가 0.8일 때 d, q축 자속선도

Fig. 5.7 d,q flux distribution of SynRM with $K_w(0.8)$

표. 5.3 전류에 따른 인덕턴스 특성 ($K_w=0.8$)

Table 5.3 Inductance characteristics according to current ($K_w=0.8$)

current	L_d	L_q	$L_d - L_q$	L_d/L_q
1	218.31	43.61	174.70	5.01
2	216.45	27.46	188.99	7.88
3	212.10	23.99	188.11	8.84
4	198.86	22.37	176.49	8.89
5	173.64	21.22	152.42	8.18
6	147.09	20.30	126.70	7.25
7	119.45	19.62	99.83	6.09
8	98.54	19.07	79.47	5.17
9	83.37	18.62	64.75	4.48
10	72.12	18.24	53.88	3.95

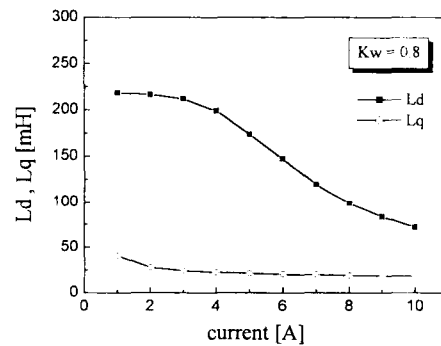


그림 5.8 전류에 따른 인덕턴스 특성 ($K_w=0.8$)

Fig. 5.8 Inductance according to current ($K_w=0.8$)

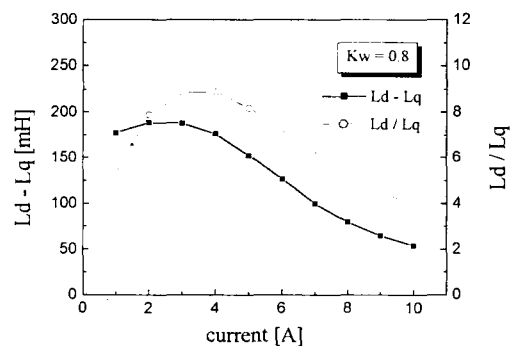
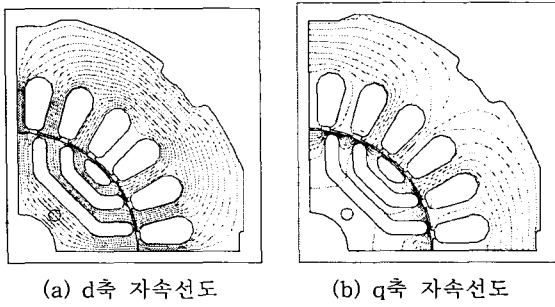


그림 5.9 전류에 따른 인덕턴스 차와 비 ($K_w=0.8$)

Fig. 5.9 Inductances ratio and difference according to Current ($K_w=0.8$)

4) K_w 가 1.0일 때 특성해석 결과 (3 Flux-barrier Model)



(a) d축 자속선도 (b) q축 자속선도
 그림 5.10 K_w 가 1.0일 때 d, q축 자속선도
 Fig. 5.10 d,q flux distribution of SynRM with $K_w(1.0)$

5. 5.4 전류에 따른 인덕턴스 특성 ($K_w=1.0$)

Table 5.4 Inductance characteristics according to current ($K_w=1.0$)

current	L_d	L_q	$L_d - L_q$	L_d/L_q
1	218.18	40.43	177.75	5.40
2	215.94	25.16	190.43	8.58
3	210.59	22.06	188.53	9.55
4	192.82	20.39	172.43	9.46
5	159.65	19.23	140.42	8.30
6	126.01	18.37	107.64	6.86
7	104.40	17.71	86.69	5.89
8	88.72	17.18	71.54	5.16
9	75.70	16.77	58.93	4.51
10	66.00	16.44	49.56	4.01

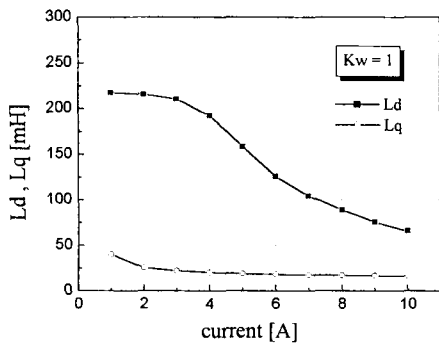


그림 5.11 전류에 따른 인덕턴스 특성 ($K_w=1.0$)
 Fig. 5.11 Inductances according to current ($K_w=1.0$)

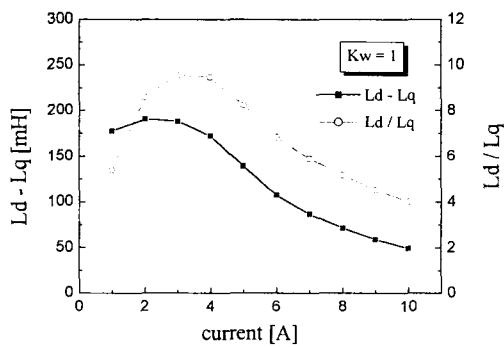
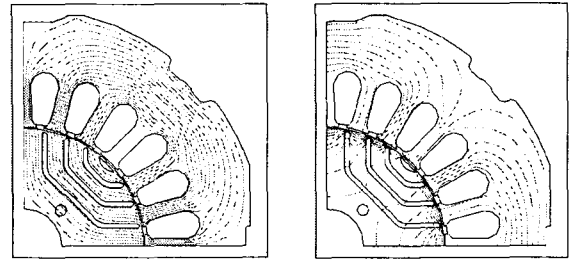


그림 5.12 전류에 따른 인덕턴스 차와 비 ($K_w=1.0$)
 Fig. 5.12 Inductances ratio and difference according to Current ($K_w=1$)

5.2 자속 장벽을 4개 사용한 경우

1) K_w 가 0.3일 때 특성해석 결과 (4 Flux-barrier Model)



(a) d축 자속선도 (b) q축 자속선도
 그림 5.13 K_w 가 0.3일 때 d, q축 자속선도
 Fig. 5.13 d,q flux distribution of SynRM with $K_w(0.3)$

표 5.5 전류에 따른 인덕턴스 특성 ($K_w=0.3$)

Table 5.5 Inductance characteristics according to current ($K_w=0.3$)

Current	L_d	L_q	$L_d - L_q$	L_d/L_q
1	218.64	70.92	147.72	3.08
2	217.18	35.64	181.54	6.09
3	213.30	32.07	181.23	6.65
4	201.13	30.60	170.53	6.57
5	178.79	29.81	148.98	6.00
6	155.08	29.30	125.78	5.29
7	127.52	28.94	98.58	4.41
8	107.63	28.66	78.97	3.76
9	90.65	28.40	62.25	3.19
10	76.47	28.16	48.31	2.72

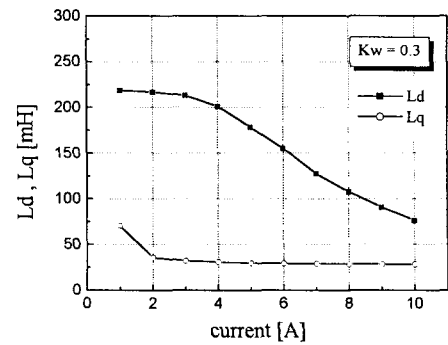


그림 5.14 전류에 따른 인덕턴스 특성 ($K_w=0.3$)

Fig. 5.14 Inductances according to current ($K_w=0.3$)

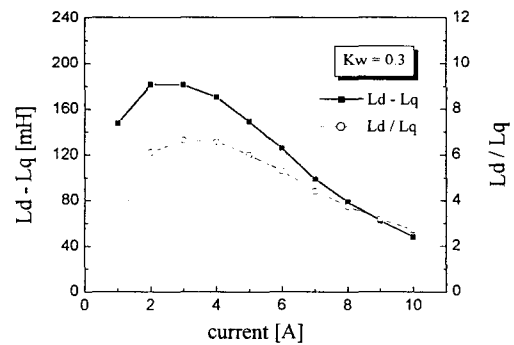


그림 5.15 전류에 따른 인덕턴스 차와 비 ($K_w=0.3$)

Fig. 5.15 Inductances ratio and difference according to Current ($K_w=0.3$)

2) K_w 가 0.5일 때 특성해석 결과 (4 Flux-barrier Model)

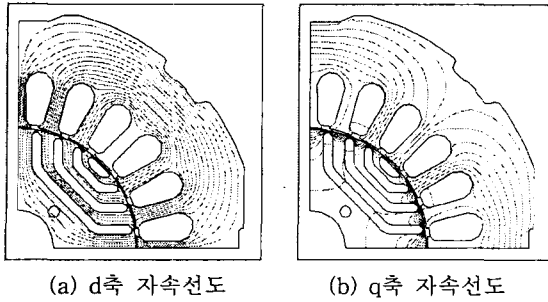


그림 5.16 K_w 가 0.5일 때 d, q축 자속선도
Fig. 5.16 d,q flux distribution of SynRM with $K_w(0.5)$

3) K_w 가 0.8일 때 특성해석 결과 (4 Flux-barrier Model)

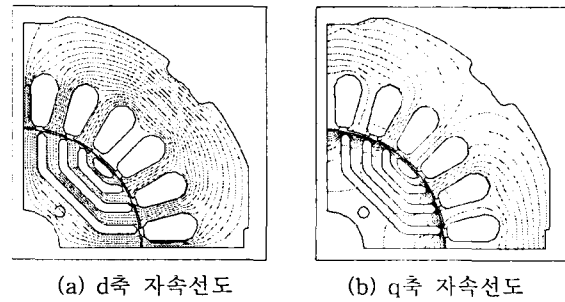


그림 5.19 K_w 가 0.8일 때 d, q축 자속선도
Fig. 5.19 d,q flux distribution of SynRM with $K_w(0.8)$

표 5.6 전류에 따른 인덕턴스 특성 ($K_w=0.5$)
Table 5.6 Inductance characteristics according to current ($K_w=0.5$)

Current	L_d	L_q	$L_d - L_q$	L_d/L_q
1	218.24	50.24	168	4.34
2	216.36	25.92	190.44	8.35
3	211.89	22.20	189.69	9.54
4	197.42	20.52	176.90	9.62
5	170.27	19.66	150.61	8.66
6	140.84	19.14	121.70	7.36
7	115.34	18.78	96.56	6.14
8	95.58	18.53	77.05	5.16
9	81.19	18.34	62.85	4.43
10	70.46	18.18	52.28	3.88

표 5.7 전류에 따른 인덕턴스 특성 ($K_w=0.8$)
Table 5.7 Inductance characteristics according to current ($K_w=0.8$)

Current	L_d	L_q	$L_d - L_q$	L_d/L_q
1	218.26	43.47	174.79	5.02
2	216.31	25.92	190.39	8.34
3	211.89	22.20	189.69	9.54
4	197.56	20.52	177.04	9.63
5	170.30	19.66	150.64	8.66
6	141.13	19.15	121.98	7.37
7	115.58	18.79	96.79	6.15
8	95.79	18.53	77.26	5.17
9	81.32	18.33	62.98	4.44
10	70.60	18.18	52.42	3.88

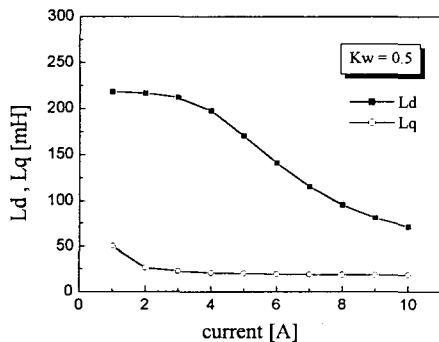


그림 5.17 전류에 따른 인덕턴스 특성 ($K_w=0.5$)
Fig. 5.17 Inductances according to current ($K_w=0.5$)

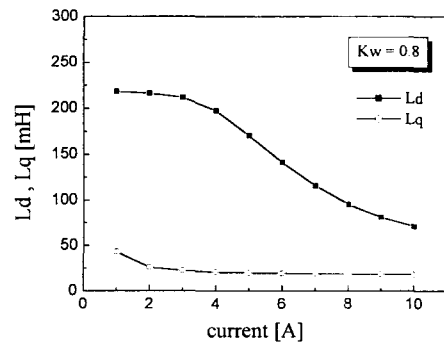


그림 5.20 전류에 따른 인덕턴스 특성 ($K_w=0.8$)
Fig. 5.20 Inductances according to current ($K_w=0.8$)

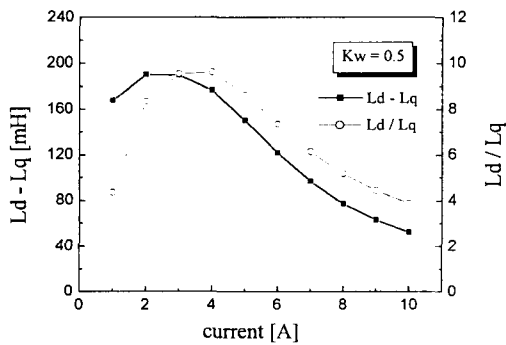


그림 5.18 전류에 따른 인덕턴스 차와 비 ($K_w=0.5$)
Fig. 5.18 Inductances ratio and difference according to Current ($K_w=0.5$)

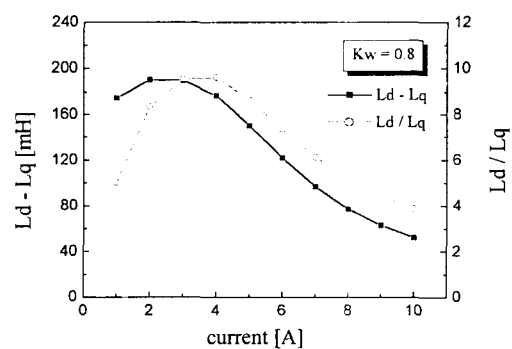
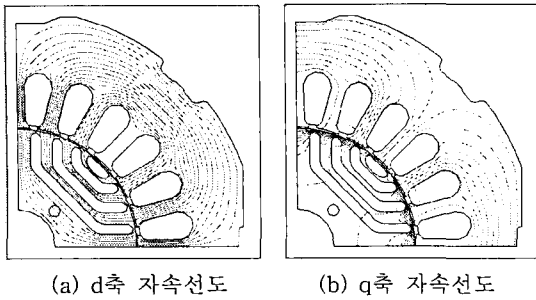


그림 5.21 전류에 따른 인덕턴스 차와 비 ($K_w=0.8$)
Fig. 5.21 Inductances ratio and difference according to Current ($K_w=0.8$)

4) K_w 가 1.0일 때 특성해석 결과 (4 Flux-barrier Model)



(a) d축 자속선도 (b) q축 자속선도
 그림 5.22 K_w 가 1.0일 때 d, q축 자속선도
 Fig. 5.22 d,q flux distribution of SynRM with $K_w(1.0)$

Table 5.8 전류에 따른 인덕턴스 특성 ($K_w=1.0$)
 Table 5.8 Inductance characteristics according to current ($K_w=1.0$)

Current	L_d	L_q	$L_d - L_q$	L_d/L_q
1	217.96	39.22	178.74	5.56
2	215.57	24.79	190.78	8.70
3	209.02	20.99	188.04	9.96
4	186.46	19.35	167.11	9.63
5	151.66	18.50	133.16	8.20
6	121.42	18.00	103.42	6.75
7	101.07	17.63	83.44	5.73
8	87.01	17.35	69.66	5.01
9	74.62	17.08	57.55	4.37
10	64.76	16.94	47.81	3.82

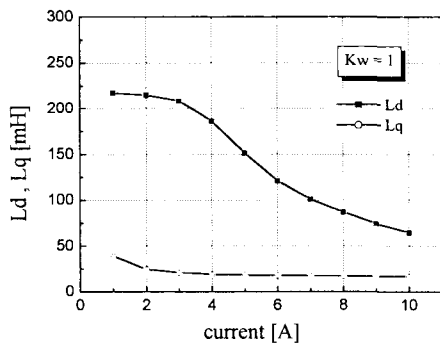


그림 5.23 전류에 따른 인덕턴스 특성 ($K_w=1.0$)
 Fig. 5.23 Inductances according to current ($K_w=1.0$)

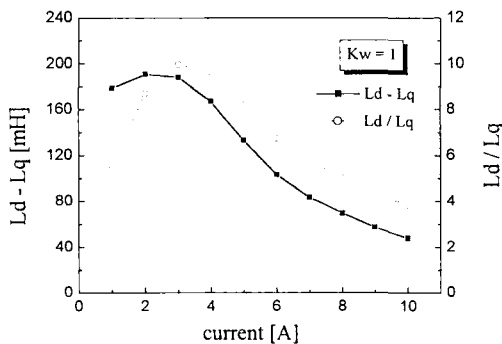


그림 5.24 전류에 따른 인덕턴스 차와 비 ($K_w=1.0$)
 Fig. 5.24 Inductances ratio and difference according to Current ($K_w=0.3$)

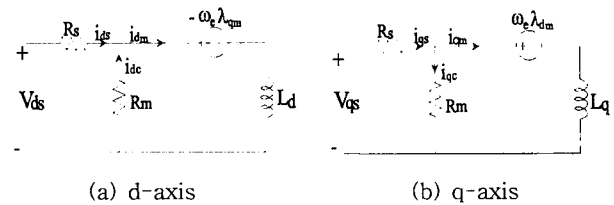
6. Synchronous Reluctance Motor의
 효율 특성 실험

6.1. 등가회로에 의한 특성 모델링

일반적으로 전동기는 철손, 동손 기계손등을 포함하고 있으며, 전동기의 특성을 결정 짓는데 중요한 성분이고, 특히 효율에 큰 영향을 준다.

본 절에서는 설계된 전동기의 철손등가저항이 포함된 등가회로를 구성하여 제어에 필요한 소프트웨어를 구성하고 DSP 보드, 전력회로, 부하장치 및 동력계, 전력계 PC등을 이용하여 효율 측정을 수행하였다.

6.1.1. 철손을 포함한 동기형 릴럭턴스 전동기의 등가회로 모델링



(a) d-axis (b) q-axis
 그림 6.1 철손을 포함한 동기좌표계에서의 등가회로
 Fig. 6.1 d-q axis equivalent circuit including iron loss

등가모델을 바탕으로 동기형 릴럭턴스 전동기의 전압방정식과 토크식을 동기축에서 나타내면 식(25)부터 식(29)과 같다.

$$V_{ds} = R_s i_{ds} + L_d \frac{di_{dm}}{dt} - \omega_e \lambda_{qm} \quad (25)$$

$$V_{qs} = R_s i_{qs} + L_q \frac{di_{qm}}{dt} + \omega_e \lambda_{dm} \quad (26)$$

$$i_{ds} = i_{dm} - i_{dc} \quad (27)$$

$$i_{qs} = i_{qm} + i_{qc} \quad (28)$$

$$T_e = \frac{3}{2} \frac{p}{2} (L_d - L_q) i_{dm} i_{qm} \quad (29)$$

$$= \frac{3}{2} \frac{p}{2} (L_d - L_q) (i_{ds} + i_{dc})(i_{qs} - i_{qc})$$

그리고 정상상태에서는,

$$i_{dc} = \frac{\omega_e \lambda_{qm}}{R_m} = \frac{\omega_e L_q i_{qm}}{R_m} \quad (30)$$

$$i_{qc} = \frac{\omega_e \lambda_{dm}}{R_m} = \frac{\omega_e L_d i_{dm}}{R_m} \quad (31)$$

(27)~(31)에서와 같이 토크 발생에 직접적인 영향을 미치는 i_{dm} , i_{qm} 는 입력 고정자 전류 i_{ds} , i_{qs} 와는 다르고 그림 6.2처럼 두 전류벡터 사이에 오차각을 유발시킨다. i_{dm} 과 i_{qm} 에는 각각 i_{qm} , i_{dm} 가 포함되어 있어서 이에 따라 발생하는 두 성분 사이의 부가적인 간섭은 정확한 토크제어를 어렵게 만든다.

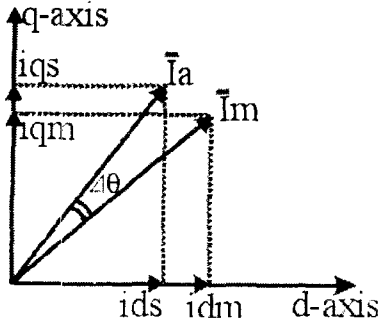


그림 6.2 전류벡터 \vec{i}_s 와 \vec{i}_m 사이의 전류벡터각 오차
 Fig. 6.2 Current vector angle error between \vec{i}_s and \vec{i}_m

6.2. 실험 시스템 구성

설계된 전동기의 효율을 측정하기 위하여 그림 6.3과 같은 실험시스템을 구성하여 실험을 하였다. 본 시스템에서는 부동소수점 연산이 가능한 Texas Instrument사의 TMS320C31 DSP를 이용해서 실시간 처리를 위한 제어보드를 구성하였으며 A/D, D/A, Hall-CT등을 사용해 센싱된 모든 값들은 디지털 처리된다. 전력회로는 다이오드 정류부, DC링크 커패시터, 3상 PWM 인버터부로 이루어지며 스위칭 소자로는 IGBT를 사용하였다.

스위칭 소자의 암쇼트를 방지하기 위해 데드타임을 만들어 주는 회로를 거쳐 PWM 신호를 발생시켰으며 그 시간은 약 4 μ sec정도로 하였다. 프로그램은 PC에서 직접 다운로드하여 사용하였다.

피드백 신호로는 전동기의 3상 전류와 엔코더의 각속도의 적분값인 θ 를 사용 하였다. 또한 회전자 1회전당 1024 펄스를 발생시키고 모터의 회전축(shaft)에 직접 끼워 넣을 수 있는 중공축(中空軸) 형 엔코더를 사용하였다.

상전류 검출에 사용된 Hall-CT는 NNC-20CAW 를 사용 하였으며, 두 상전류를 전압의 형태로 검출하여 A/D 변환기를 거쳐 DSP에서 필요한 디지털 정보로 사용하였다. 이때 사용된 CT는 100[A] 당 4[V]의 출력을 발생하기 때문에 전류검출의 해상도를 높이기 위해 10회 감아서 10[A]당 4[V]를 얻게 하였다. 그림 4.4은 시스템의 실제 구성도이다.

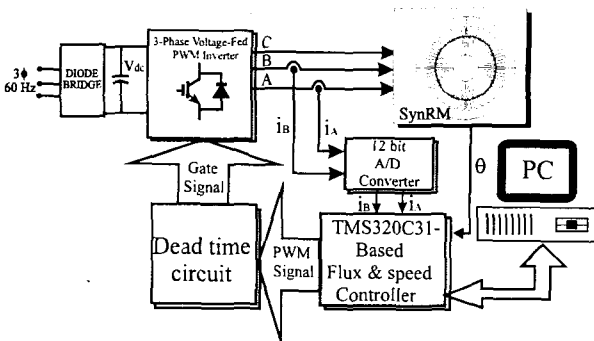


그림 6.3 실험 장치 구성도
 Fig. 6.3 Experimental system configuration

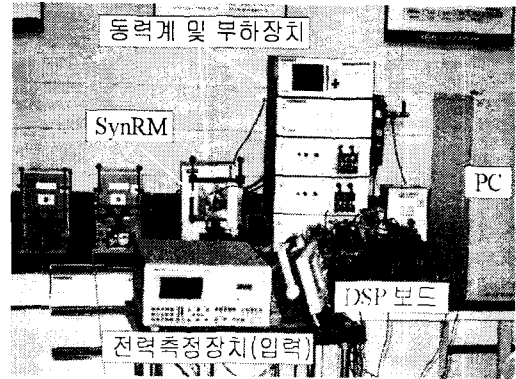


그림 6.4 실 실험 장치
 Fig. 6.4 Prototype of A experimental system

그림 6.5는 SynRM과 Coupling된 동력계를 보여준다. 그리고 그림 6.6은 SynRM의 회전자 형상과 77mm로 적층된 전체 회전자 구조를 보여준다. 그림 6.7은 회전자와 고정자 단면을 보여준다. 고정자는 340W급 동급 유도모터의 고정자이다. 그림 6.8은 조립된 SynRM이다.

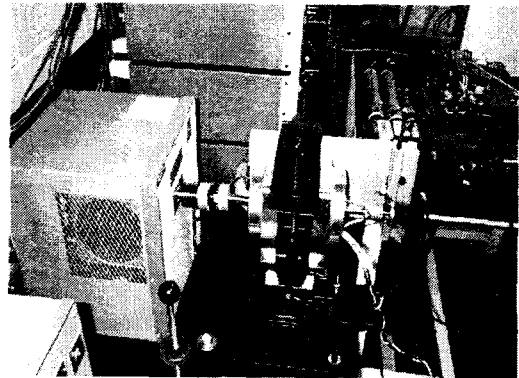


그림 6.5 SynRM과 Coupling된 동력계
 Fig. 6.5 Dynamometer coupled with SynRM

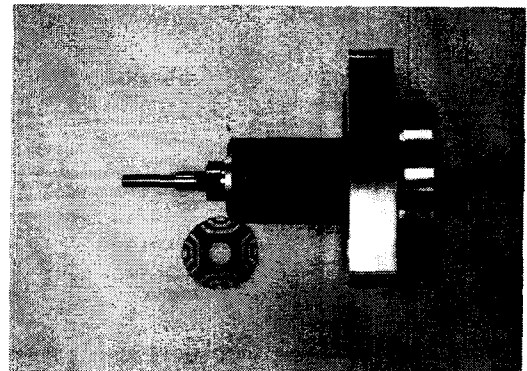


그림 6.6 SynRM의 회전자형상과 적층된 회전자
 Fig. 6.6 Rotor Shape of SynRM and Laminated Rotor

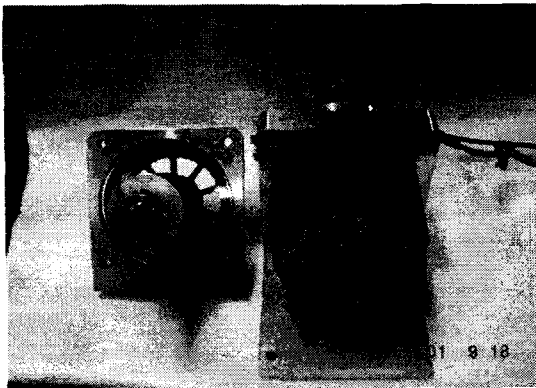


그림 6.7 SynRM의 회전자 및 고정자 단면
Fig. 6.7 Rotor and Stator Prototypes of SynRM

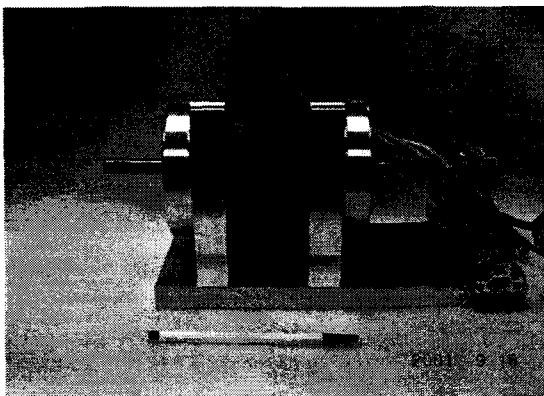


그림 6.8 조립된 SynRM
Fig. 6.8 Prototype of SynRM

6.3. 실험 결과 및 고찰

설계된 전동기의 효율성을 알아보기 위하여 효율측정실험을 수행하였다. 입력측정은 VOLTEC PM3300을 사용하였으며, 입력은 PWM파형이기 때문에 정확도를 위하여 최대 허용치인 64 사이클로 측정하여 오차를 최소화하였다. 출력단에는 스가와라000를 사용하여 출력 토크를 측정하였고, 부하조건도 함께 수행하였다.

일반적인 SynRM의 토크일반식을 그림6.2로부터 다시 쓰면 다음과 같다.

$$T_e = \frac{2}{3} \frac{P}{2} (L_d - L_q) i_2^2 \frac{\sin 2\psi}{2}$$

윗 식에서 보듯와 같이 토크는 전류의 제곱과 $\sin 2\psi$ 에 비례한다. 따라서 이상적인 전동기에서는 $\psi = 45^\circ$ 에서 단위전류당 최대 토크가 발생한다.

철손을 고려치 않은 이상적인 전동기의 경우 단위 입력 전류 벡터와 d축 사이의 각이 45° 일 때 단위 전류당 최대 토크를 발생한다. 이는 전류에 의한 동손이 최소로 되면서 최대 토크를 만족시킬 수 있다. 그런데 철손을 고려할 경우 최대 토크를 발생시키는 조건은 i_m 과 i_s 의 사이각 $\Delta\psi + 45^\circ$ 가 되

어 단위전류와 d축 사이의 전류각은 더 커지게 된다. 벡터제어를 적용하면 d, q축 전류 성분을 원하는 조건에 맞게 제어할 수 있다. 따라서 45° 이상이 되도록 q축 전류와 d축 전류를 제어하여 단위 전류당 최대 토크를 발생시키는 최대 토크 운전을 할 수 있다.

SynRM의 회전자 구조를 볼 때 d축의 자기회로는 투자율이 비선형인 자성재료가 지배적으로 구성되어 있어 전류 증가에 민감한 반면 q축은 투자율이 선형인 공기의 구성 비율이 많다. 따라서 전류의 증가에 따라 d, q축은 자기회로의 구성요소의 투자율에 따라 각각 다른 자기포화 효과를 가지게 된다. 자속장벽형 회전자 구조의 릿(rib)부분은 상당히 좁은 자기 통로를 가지고 있어 더욱 자기포화에 민감하다.

자기포화가 일어나면 자성재료의 비선형 투자율로 인해 전류가 증가하더라도 그에 비례하여 자속이 증가하지 않는다. 그러므로 전류 증가에 따라 인덕턴스는 감소하게 된다. 이 현상은 특히 d축에서 심하게 나타난다. 릴럭턴스 전동기는 토크식에 표현한 바와 같이 d, q축 인덕턴스 차이 $L_d - L_q$ 에 의해 토크를 발생시키므로 자기 철심이 포화되면 d축 인덕턴스 L_d 가 감소하게 되어 비포화시의 경우보다 전류를 더욱 증가시켜야 원하는 토크를 얻을 수 있다. 포화시 q축 인덕턴스의 변화량이 d축 인덕턴스의 변화량 보다 적으므로 d축 전류를 증가시키는 것 보다 q축 전류를 증가시키는 것이 훨씬 효과적이다. 따라서 동손을 최소로 하는 전류당 최대 토크 조건이 되는 45° 보다 커지게 된다. 부하가 증가될수록 이 현상은 더욱 심하게 된다.

하지만 본 연구는 최대 효율을 내는 최적 제어알고리즘을 찾는 것보다는 각각 부하와 이에 따르는 전류각 그리고 각각의 rpm에서의 효율을 알아보고 SynRM의 산업분야 적용가능성과 우수성을 확인하는 것이다.

효율 특성 실험은 구성된 하드웨어와 소프트웨어를 가지고 $i_d = 3[A](2000, 3000 \text{ rpm})$, $i_q = 2.5[A](1000, 2000, 3000, 3600)$ 에서 수행하였다. 효율이 비교적 낮은 저속 구간에서는 실험을 수행하지 않았으며, d축 전류 3[A]에서는 역기전력의 증가로 3000 rpm 이상에서의 실험은 수행할 수 없었다. 부하는 탈출토크에 이르기까지 2 [kg-cm]씩 증가시켜 각각의 전류각, 상전류, q축 전류를 측정하였고, 입력과 출력을 측정하여 효율을 계산하였다. 그리고 각각의 경우, rpm에 따라 다른 전류각을 가지지만, 대략 전류각 30~60도 사이 최대 효율이 나올만한 지점에서 0.5[kg-cm]씩 증가시켜가며, 효율의 최대치를 찾았다.

표6.1~6.6 과 그림 6.9 ~6.14까지는 효율 측정 실험 결과를 보여준다. 이론상에서 보여준 것처럼 철손과 포화 등의 영향으로 각각의 rpm 과 부하조건에서 전류각 45도를 벗어나 최대 효율이 나타남을 알 수 있다.

결과를 검토해 보면, 표4.6과 그림4.14에서 볼 수 있는 바와 같이 d축 전류 2.5[A], 3600rpm, 부하 9[kg-cm], 전류각 50.3도에서 최대효율 89.2%가 나타남을 알 수 있다.

결과적으로 본 연구에서 설계된 시작기의 효율은 최대 90%까지임이 확인되었다. 본 효율측정에 있어 제어알고리즘은 일반적인 알고리즘이다. 200W~400W급 SynRM에서는 철손과 포화를 고려한 제어 알고리즘을 사용하면 효율을 2~3% 올릴 수 있는 것으로 알려져 있다. 따라서 본 시작기는

효율 92~93%에서 운전 될 수 있는 것으로 사료되며, 동급 유도기 또는 기타 다른 동급전동기가 사용되는 산업 전반에 전동기 제작비용 절감 및 에너지 절감 효과를 가져올 것으로 사료된다.

그림 6.15는 SynRM의 벡터제어 4상한 응답특성을 보여준다. 속도명령을 +500rpm으로 주었을 때의 응답 특성으로서 응답 적용도가 상당히 양호함을 알 수있다. 유도기와 비교해서 회전자의 파라미터변화가 없고, 슬립 등을 계산할 필요가 없기 때문에 제어능력도 우수함을 알 수 있다.

표 6.1 id = 3A, 2000rpm 에서의 효율 특성

Table 6.1 Efficiency characteristics at id = 3A, 2000rpm

부하 [kg-cm]	입력[W]	출력[W]	효율[%]	전류(iq) [A]	상전류 [A]	부하각 [deg.]
6	157	122	77.7	2.47	1.56	28.1
8	205	163	79.5	2.7	2.15	36
8.5	293	245	83.6	3.4	3.45	48.7
9	348	286	82.2	3.8	4.19	54.2
10	248	204	82.3	3	2.76	42.7

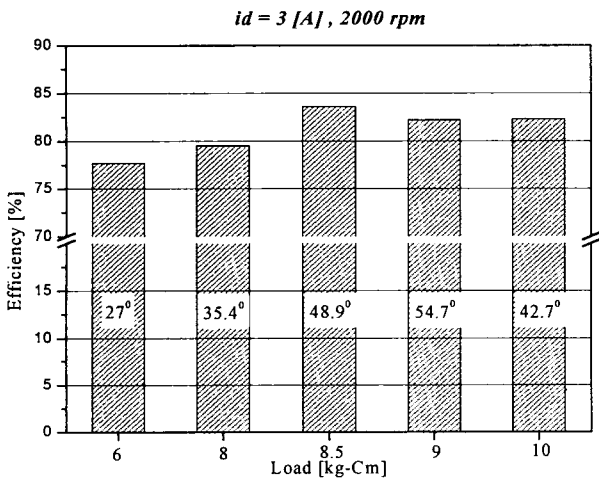


그림 6.9 id = 3A, 2000rpm 에서의 효율 특성
Fig. 6.9 Efficiency characteristics at id = 3A, 2000rpm

표 6.2 id = 3A, 3000rpm 에서의 효율 특성

Table 6.2 Efficiency characteristics at id = 3A, 2000rpm

부하 [kg-cm]	입력[W]	출력[W]	효율[%]	전류(iq) [A]	상전류 [A]	부하각 [deg.]
6	223	183	82	2.5	1.56	27
8	288	245	85.1	2.75	2.16	35.4
8.5	420	367	87.4	3.45	3.52	48.9
9	492	429	87.2	3.9	4.29	54.7
10	353	306	86.7	3.1	2.8	42.7

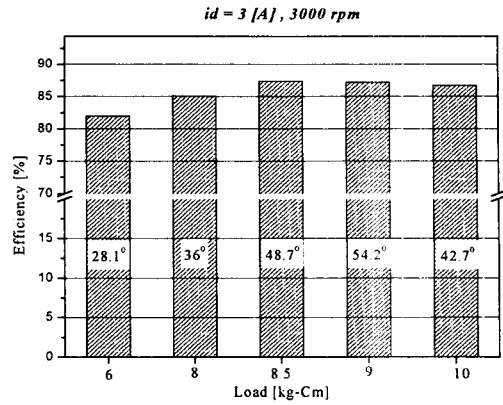


그림 6.10 id = 3A, 3000rpm 에서의 효율 특성
Fig. 6.10 Efficiency characteristics at id = 3A, 2000rpm

표 6.3 id = 2.5A, 1000rpm 에서의 효율 특성

Table 6.3 Efficiency characteristics at id = 2.5A, 2000rpm

부하 [kg-cm]	입력[W]	출력[W]	효율[%]	전류(iq) [A]	전류[A]	부하각 [deg.]
4	59	40	67.8	2	1.28	28.4
6	83	60	72.3	2.3	1.97	39
8	108.3	81	74.8	2.7	2.7	47.3
10	138.6	101	72.8	3.2	3.52	54.4
12	171.5	122	71.1	3.7	4.4	60

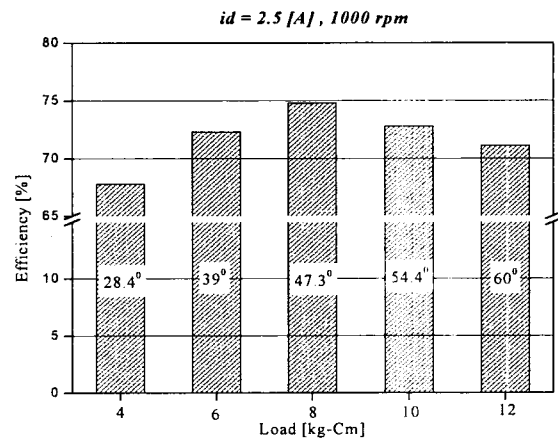


그림 6.11 id = 2.5A, 1000rpm 에서의 효율 특성
Fig. 6.11 Efficiency characteristics at id = 2.5A, 1000rpm

표 6.4 id = 2.5A, 2000rpm 에서의 효율 특성

Table 6.4 Efficiency characteristics at id = 2.5A, 2000rpm

부하 [Kg-cm]	입력[W]	출력[W]	효율[%]	전류(iq) [A]	전류[A]	부하각 [deg.]
4	107.3	81	75	2.1	1.29	28.3
6	150.8	122	80	2.35	2	39.2
8	198	163	82	2.8	2.77	47.9
10	246	204	83	3.3	3.65	55.2
12	312	244	78	3.9	4.7	61.5

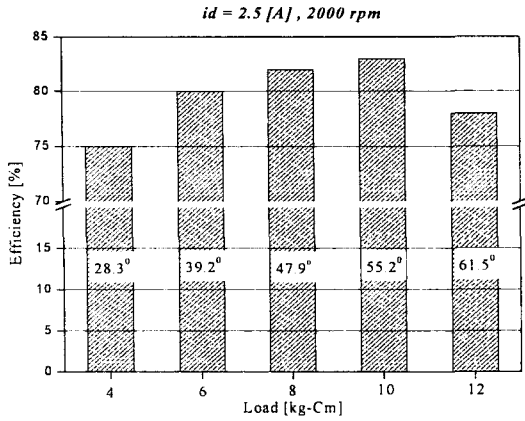


그림 4.12 id = 2.5A, 2000rpm 에서의 효율 특성
 Fig. 4.12 Efficiency characteristics at id = 2.5A, 2000rpm

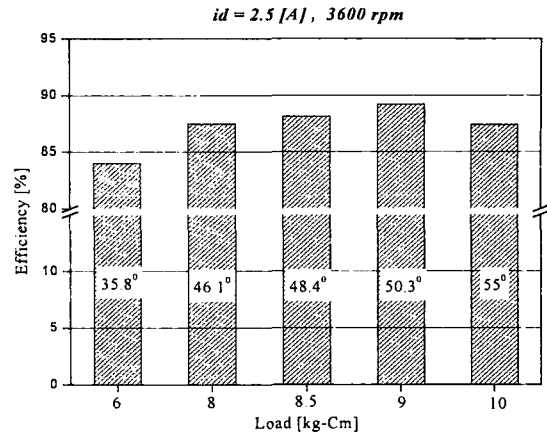


그림 6.14 id = 2.5A, 3600rpm 에서의 효율 특성
 Fig. 6.14 Efficiency characteristics at id = 2.5A, 3600rpm

3. 4.5 id = 2.5A, 3000rpm 에서의 효율 특성
 Table 4.5 Efficiency characteristics at id = 2.5A, 3000rpm

부하 [kg-cm]	입력 [W]	출력 [W]	효율 [%]	전류(iq) [A]	전류[A]	부하각 [deg.]
4	152	122	80.3	2.1	1.3	27.5
6	220	183	83	2.37	2.03	38
8	301	244	81	2.8	2.85	48.4
8.5	312	260	83.33	3	3.1	50.8
9	337	275	81.6	3	3.3	52.6
9.5	352	290	82.4	3.2	3.52	54.4
10	355	306	86.2	3.36	3.76	55.9
12	435	368	84.6	4.05	4.91	62.6

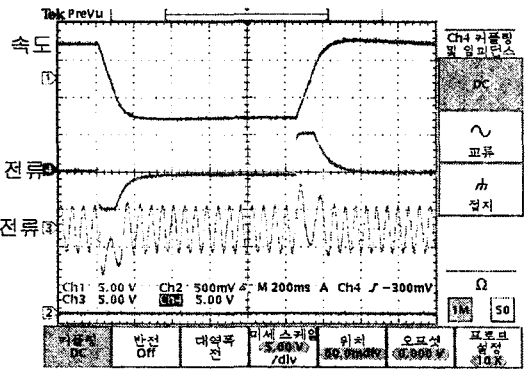


그림 6.15 SynRM의 벡터제어 4상한 운전 특성
 Fig. 6.15 Quadratic operation characteristics vector control of SynRM

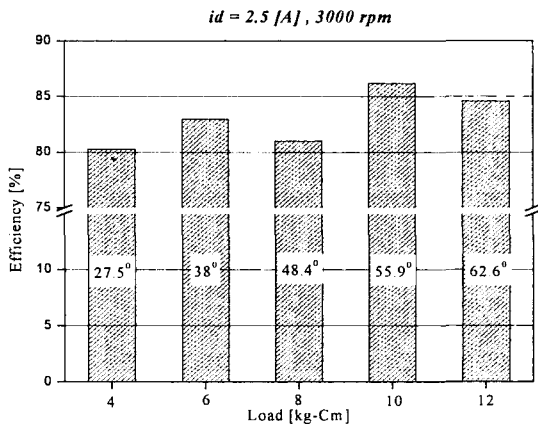


그림 6.13 id = 2.5A, 3000rpm 에서의 효율 특성
 Fig. 6.13 Efficiency characteristics at id = 2.5A, 3000rpm

3. 6.6 id = 2.5A, 3600rpm 에서의 효율 특성
 Table 6.6 Efficiency characteristics at id = 2.5A, 1000rpm

부하 [kg-cm]	입력 [W]	출력 [W]	효율 [%]	전류(iq) [A]	전류[A]	부하각 [deg.]
6	262	220	84	2.56	2	35.8
8	336	294	87.5	3	2.85	46.1
8.5	354	312	88.13	3.06	3.1	48.4
9	370	330	89.2	3.22	3.27	50.3
10	421	368	87.4	3.6	3.82	55

4. 결 론

본 연구에서는 토크 및 역률 특성에 영향을 미치는 슬롯, 공극, 자속 장벽 등의 여러 설계 변수를 고려하여 인덕턴스 특성을 개선함으로써 고 토크 고 역률 특성을 얻을 수 있는 회전자 구조적인 조건을 도출하였다. 설계시 정확한 해석을 통한 특성분석을 위하여 자기적 비선형성 및 복잡한 형상의 전동기를 정확하게 해석할 수 있는 장점을 가지고 있는 유한요소법(Finite Element Method; FEM)을 이용하여 해석을 수행하였다. 또한 형상변화에 따르는 자동 CAD화일 작성프로그램을 개발하고 이에 따르는 자동선처리 프로그램의 개발을 통해 설계 과정 시간을 단축하였다. 설계된 전동기를 제작하고 효율을 측정하기 위해 DSP가 내장된 인버터와 부하장치, 토크미터 등으로 시스템을 구성하여, 각 부하별, 전류각별로 효율을 측정하였고, 벡터제어 응답특성을 분석하여 동기형 릴럭턴스 전동기의 우수성 및 산업 적용가능성을 확인하였다.

결과적으로 본 연구에서 설계된 시작기의 효율은 최대 90%까지임이 확인되었다. 본 효율측정에 있어 제어알고리즘은 일반적인 알고리즘이다. 200W~400W급 SynRM에서는

철손과 포화를 고려한 제어 알고리즘을 사용하면 효율을 2~3% 올릴 수 있는 것으로 알려져 있다. 따라서 본 시작기는 효율 92~93%에서 운전 될 수 있는 것으로 사료되며, 동급 유도기 또는 기타 다른 동급전동기가 사용되는 산업 전반에 전동기 제작비용 절감 및 에너지 절감 효과를 가져올 것으로 사료된다.

또한 SynRM의 벡터제어 4상한 응답특성분석을 통해 응답 적응도가 상당히 양호함을 알 수있었으며, 유도기와 비교해서 회전자에 파라미터변화가 없고, 슬립 등을 계산할 필요가 없기 때문에 제어능력도 우수함을 알 수 있었다.

추후 연구 목표는 다음과 같다.

- ▶ 최적 제어 알고리즘개발 (센서리스 제어 포함)
- ▶ 철손 등을 고려한 최적설계 기법 개발
- ▶ 토크리플 문제의 해결 방법

위와 같은 문제를 고려하여 연구가 지속된다면, 기타 다른 전동기와 달리 SynRM에서 만큼은 선진국에 비해 기술의 우수성을 선점하리라 본다. 많은 분들은 연구 참여를 권하는 바이며, 정부 혹은 기업체의 많은 지원을 바란다.

감사의 글

본 연구는 기초전력공동연구소 단기과제(과제번호: 00-043)지원으로 수행되었습니다.

참 고 문 헌

[1] J. H. Lee, D. S. Hyun, "Hysteresis Characteristics Computation on PWM Fed Synchronous Reluctance Motor Using Coupled FEM & Preisach Modeling", *IEEE Transaction on Magnetics*, Vol. 36, No. 7, pp 1209~1212, July 2000.

[2] J. H. Lee, J. C. Kim, D. S. Hyun, "Hysteresis Modelling of Synchronous Reluctance Motor Considering PWM input Voltage", *Journal of Physica B*, Vol. 275, pp 238~247, Jan. 2000.

[3] J. H. Lee, D. S. Hyun, "Hysteresis Analysis for Permanent Magnet Assisted Synchronous Reluctance Motor by Coupled FEM & Preisach Modelling", *IEEE Transaction on Magnetics*, Vol. 35, No. 5, pp. 1203~1206, May 1999.

[4] J. H. Lee, J. C. Kim, D. S. Hyun, "Effect of Magnet on Ld and Lq Inductance of Permanent Magnet Assisted Synchronous Reluctance Motor", *IEEE Transaction on Magnetics*, Vol. 35, No. 5, pp. 1199~1202, May 1999.

[5] J. C. Kim, J. H. Lee, I. S. Jung, D. S. Hyun, "Vector Control Scheme of Synchronous Reluctance Motor Considering Iron Core Loss", *IEEE Transaction on Magnetics*, Vol. 34, No. 5, pp. 2522-2525, Sep. 1998.

[6] J. H. Lee, J. C. Kim, D. S. Hyun, "Dynamic Characteristic Analysis of Synchronous Reluctance Motor Considering Saturation and Iron Loss by FEM", *IEEE Transaction on Magnetics*, Vol. 34, No. 5, pp. 2629-2632, Sep. 1998.

[7] 이중호, 현동석, "철손을 고려한 동기형 릴럭턴스 전동기의 유한요소해석", *대한전기학회 논문지*, 제48권, 제4호, pp. 187-193, 1999. 4

[8] 이중호, 김정철, 현동석, "단편형 회전자구조 동기형 릴럭턴스전동기와 유도전동기의 특성비교에 관한 연구", *대한전기학회논문지*, 제47권, 제9호, pp. 1343-1350, 1998. 9.

[9] 이중호, 김정철, 현동석, "철손의 영향을 고려한 단편형 동기형 릴럭턴스 전동기의 벡터제어", *대한전기학회논문지*, 제47권, 제8호, pp. 1162-1168, 1998. 8.

[10] 이중호, 현동석, "유한요소법을 이용한 단편형 회전자구조 동기형 릴럭턴스 전동기의 특성해석", *대한전기학회 논문지*, 제47권, 8호, pp. 1116-1122, 1998. 8.

[11] 장석명, 박병익, 이성호, 이중호, "단편형 동기 릴럭턴스 전동기의 토크 및 역률개선을 위한 회전자 설계", *대한전기학회논문지*, 제50권, 6호, pp. 263-272, 2001. 6

[12] 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

[13] 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

[14] 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

저 자 소 개



이 중 호(李 重 浩)

1968년 8월 21일생. 1993년 한양대 공대 전기공학과 졸업. 1995년 동 대학원 전기공학과 졸업(석사). 1999년 동 대학원 전기공학과 졸업(공학박). 1999년 9월~2000년 2월 한양대학교 부설 산업과학 연구소 선임연구원. 2000년 3월~2002년

2월 도림충북과학대학 전기과 전임강사. 2002년 3월~현재 국립한밭대학교 전기공학과 전임강사

Tel : 042-821-1098, Fax : 042-821-1088

E-mail : limotor@hanbat.ac.kr