

高出力 應用을 위한 永久磁石 埋入刑 同期 릴럭턴스 電動機의 特性解析

論 文

53B-10-1

Characteristic Analysis of Permanent Magnet Assisted Synchronous Reluctance Motor for High Power Application

張永珍[†] · 金琪復^{*} · 李重浩^{**} · 金相吉[§] · 莘興教^{§§}

(Young-Jin Jang · Gi-Bok Kim · Jung-Ho Lee · Sang-Gil Kim · Heung-Kyo Shin)

Abstract - In this paper, finite element analysis for a PMASynRM is presented and the characteristic analysis of inductance and torque is performed under the effect of saturation. The focus of this paper is characteristic analysis of d and q-axis inductances and torque according to magnetizing quantity of interior permanent magnet for PMASynRM. The d and q-axis current component ratios, load angles of a PMASynRM are investigated quantitatively on the basis of the proposed analysis method and the experimental test. Comparisons are given with output characteristic curves of normal SynRM and those according to the load in PMASynRM, respectively. And it is confirmed that the proposed model results in high output power performance.

Key Words : PMASynRM, FEM, Ld, Lq, High Power Application

1. 서 론

동기 릴럭턴스 전동기는 회전자의 d축과 q축의 인덕턴스 차(Ld-Lq)와 비(Ld/Lq)를 크게 함으로써 토크특성이나 역률을 크게 개선시킬 수 있으며, 이와 관련하여 회전자의 설계에 관한 연구가 활발히 이루어지고 있다.

현재 동력 및 제어용으로 사용되고 있는 유도전동기를 대체할 수 있는 전동기로서의 타당성 연구로서, 등가회로에 의한 특성을 고찰하고, 실험을 통하여 검증하는 연구가 이루어지고 있다. 국내외의 여러 연구에서 동기 릴럭턴스 전동기의 토크 및 효율 등이 동일한 부피의 최적 설계된 유도전동기와 비교할 때 동등 이상임을 확인하여, 고효율 전동기로서 기존 서보용 전력기기의 대체 가능성이 확인되었다.[1],[2]

동기 릴럭턴스 전동기의 회전자 구조는 돌극 구조로, 토크는 d축과 q축의 인덕턴스 차에 직접 관계되고, 최대 역률은 두 인덕턴스의 비에 의존한다. 따라서 d축 인덕턴스와 q축 인덕턴스는 동기 릴럭턴스 전동기의 특성을 결정하는 중요한파라미터이므로, 기기의 성능을 정확히 예측하기 위해서는 정확하게 도출해내야만 한다.

유한요소법과 같은 분포정수형 해석은 자기적 비선형성

및 복잡한 형상의 전동기를 비교적 정확하게 해석할 수 있는 장점이 있으므로, 유한요소법을 이용한 동기 릴럭턴스 전동기에 대한 정특성 해석의 연구결과가 많이 발표되었다.[3]-[5].

동기형 릴럭턴스 전동기 개선방향으로서, 영구자석을 적절하게 삽입한 영구자석 매입형 동기 릴럭턴스 전동기(Permanent Magnet Assisted Synchronous Reluctance Motor : PMASynRM)는 토크밀도와 역률을 크게 향상시킬 수 있다.[6],[7] 본 논문은 이러한 동기 릴럭턴스 전동기의 q축 인덕턴스를 감소시켜 토크밀도와 역률을 개선하기 위해서 영구자석의 자로를 q축 자속의 반대 방향으로 삽입한 영구자석 매입형 동기 릴럭턴스 전동기를 해석대상으로 유한요소법을 이용하여 포화의 영향을 고려한 특성분석을 수행하였다. 산업체의 생산단가의 상승을 고려해 페라이트 영구자석을 사용하였으며, 가격대비 성능의 향상을 가져올 수 있다. 따라서 페라이트 자석을 사용하였기 때문에 0.4T이하의 값중 0.1, 0.2, 0.3, 0.4T의 경우로 나누어 비교하였으며, 일반적인 SynRM과의 특성을 비교 수행하였다.

영구자석 매입형 동기 릴럭턴스 전동기의 유한요소해석에 있어서 인덕턴스 특성 및 토크특성 분석을 각각의 잔류 자속 밀도 량에 따라 수행하였다. 전반적 토크특성을 고려하기 위해서는 입력은 최소 한주기 이상이 되어야 하며, 입력과 속도에 따르는 회전자의 회전조건을 고려해야만 한다. 따라서 제안된 수치기법에서는 이동 메쉬(mesh) 개념의 요소 재분할법이 사용되었다.[8]

영구자석 매입은 전자력과는 무관한 릴럭턴스 토크의 상승을 가져오며, 여기서는 등가철손 저항이 고려된 등가회로를 이용하여 일반 동기 릴럭턴스 전동기와의 특성을 비교분석하고, 최대효율 운전조건인 d축분 전류와 q축분 전류 성분비 및 부하각 차이에 대한 개념을 분석 도출하였다. 일반 동기 릴럭턴스 전동기와 본 논문에서 제안한 시작기 제작과 드

[†] 교신저자, 學生會員 : 한밭대학교 電氣工學果 碩士課程

E-mail : jyj6936@naver.com

^{*} 學生會員 : 한밭대학교 電氣工學果 碩士課程

^{**} 正會員 : 한밭대학교 電氣工學果 副教授·工博

[§] 正會員 : 大田技能大學 電氣計測制御果 副教授·工博

^{§§} 正會員 : 慶尙大學校 電氣電子工學部 教授·工博,
工學研究院 責任研究員

接受日字 : 2004年 4月 6日

最終完了 : 2004年 8月 31日

라이버를 구성하고 벡터제어 운전실험을 각 부하별로 수행하여 기존 동기 릴럭턴스 전동기와 비교한 특성곡선을 도출하였고, 출력상승과 성능향상이 확보됨을 확인하였다.

2. 영구자석 매입형 동기 릴럭턴스 전동기 (PMASynRM)의 특성

2.1 토크 특성

본 연구에 있어 영구자석 매입형 동기 릴럭턴스 전동기 (Permanent Magnet Assisted Synchronous Reluctance Motor; PMASynRM)의 정현파 회전 자계로 구동되므로 고정자는 유도전동기의 고정자와 구조가 같으며, 고정자 권선은 공심 집중권으로 시행되고 회전자는 극당 3개의 자속 장벽을 가지고 있다.

전자기 토크를 d, q축 변수로 표현하면 일반 동기기의 토크 식과 동일한 식 (1)과 같이 나타낼 수 있다.

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

여기서 P는 극 수이다.

식(1)에서 보는 바와 같이 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 2.1에 의해 식 (2)와 같이 표현할 수 있으며, 식 (2)를 식 (1)에 대입하면 식 (3)과 같은 전자기 토크를 유도할 수 있다.

$$i_{ds} = I_a \cos \phi, \quad i_{qs} = I_a \sin \phi \quad (2)$$

$$T_e = \frac{3}{2} \cdot \frac{P}{2} (L_d - L_q) I_a^2 \frac{\sin 2\phi}{2} \quad (3)$$

일반적인 SynRM의 특성을 개선하기 위해 회전자의 자속장벽에 영구자석을 매입하면, 그 특성개선 원리 및 토크 표현식은 다음과 같다.

q축 자속 경로에 영구자석을 매입했을 때, d축과 q축에 대한 쇄교자속은 각각 식 (4), 식 (5)과 같이 표현된다.

$$\lambda_{ds} = L_{ds} i_{ds} \quad (4)$$

$$\lambda_{qs} = L_{qs} i_{qs} + \lambda_{mq(pm)} \quad (5)$$

여기서, L_{ds} 와 L_{qs} 는 각각 d축과 q축 인덕턴스이며, $L_{ds} \neq L_{qs}$ 이다. 또한, 토크는 식 (6)과 같이 표현된다

$$T_{pmr} = \frac{3}{2} \cdot \frac{P}{2} [(L_{ds} - L_{qs}) i_{qs} i_{ds} + \lambda_{mq(pm)} i_{ds}] \quad (6)$$

그림 2.1는 q축 자속에 완전히 반발하기 위해 영구자석의 영향을 반영한 페이저도를 나타낸다.

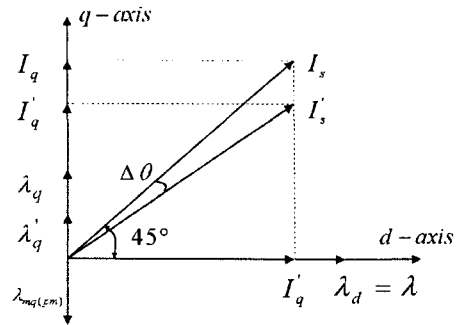


그림 2.1 PMASynRM의 전류 페이저도

Fig. 2.1 Current phaser diagram corresponding to PMASynRM

그림 2.1에서 볼 수 있는 바와 같이 q축 자속을 반발하기 위해 매입한 영구자석으로 인해 λ_q 가 λ_q 로 감소했다면, 동일 토크를 나타내기 위해서는 i_q 는 또한 i_q 로 감소해야 한다. 따라서 최대 토크를 내는 전류각은 식 (3)에서 보여주는 바와 같이 45° 에서 벗어나 나타나게 된다. 따라서, 영구자석 매입형 동기 릴럭턴스 전동기의 최대출력 포인트는 일반적 동기 릴럭턴스 전동기의 최대출력 포인트 $\Delta\phi + 45^\circ$ 보다 $\Delta\theta$ 만큼 더 이동하여 나타난다고 볼 수 있다.

그림 2.2는 영구자석이 q축 자속을 반발하는 원리를 나타낸다.

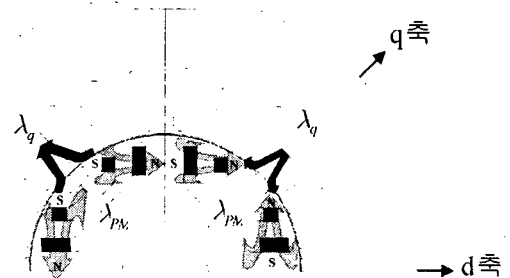


그림 2.2 PMASynRM의 자속 흐름도

Fig. 2.2 Flowing flux of PMASynRM

2.2 최대 역률 특성

PMASynRM의 단점으로 빈번하게 논의되는 것중의 하나는 저역률(poor power factor) 특성이다. 이러한 PMASynRM의 최대역률특성 $\cos \phi_{max}$ 는 다음과 같다.

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

따라서, 회전자 설계 시 식 (6)과 식 (7)의 토크와 최대역률에 영향을 미치는 변수인 d, q 인덕턴스의 차이와 비율 증가시킴으로써 토크 및 역률 특성을 개선시킬 수 있음을 알 수 있다.

2.3 PMASynRM의 회전자 설계

2.3.1 설계 모델과 설계 시 고려사항

PMASynRM의 고정자는 유도전동기의 고정자와 구조가 동일하므로 주 설계 대상은 회전자이다. 본 연구에서는 일반 SynRM의 회전자 구조에 영구자석을 매입함으로써 토크와 역률을 개선하고자 하였다.

다시 말해서 PMASynRM의 주요 설계목표는 동급SynRM보다 고출력을 내는데 그 초점이 맞추어 있다. 따라서 정격 출력, 정격 rpm, 정격전압 등은 미리 정해지는 양이며, 설계자가 건드릴 수 있는 요소는 부하에 따르는 정격출력을 내는 데 필요한 고정자의 전류밀도 및 특히 회전자 구조에 따른 d, q 인덕턴스 정도이다. 회전자의 설계는 식(6)과 식(7)에서 나타난 바와 같이 토크에 중요한 영향을 미치는 요소인 d축과 q축 인덕턴스 비(Ld/Lq)와 차(Ld-Lq)를 기준으로 시행되었다. 표 2.1은 본 연구의 대상인 기본모델의 기본 사양이다. 아래의 그림 2.3은 일반 SynRM에 영구자석을 매입한 PMASynRM의 회전자 구조를 나타내고 있다.

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

영구자석 매입형 동기 릴럭턴스 전동기	
상수	3
극수	4
출력[W]	340 [W]
속도[rpm]	3600 [rpm]
1차 저항[Ω]	0.784 [Ω]
권선	144턴/상, 분포권
슬롯	24개
회전자 적층길이 [mm]	77 [mm]
공극[mm]	0.4 [mm]

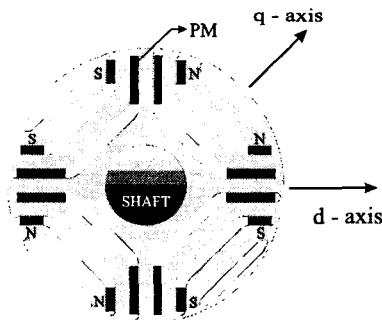


그림 2.3 PMASynRM의 회전자 구조
Fig 2.3 Rotor cross-section of PMASynRM

3. 지배방정식 유도 및 정식화

3.1 PMASynRM의 지배방정식

맥스웰의 방정식은 다음과 같다.

$$\nabla \times \vec{H} = \vec{J}_o + \vec{J}_m \quad (8)$$

$$\nabla \cdot \vec{B} = 0 \quad (9)$$

$$\vec{B} = \mu \vec{H} \quad (10)$$

식 (8), 식 (9), 식 (10)에 의하여 자속밀도와 자기 벡터 포텐셜과의 관계 $\vec{B} = \nabla \times \vec{A}$ 를 도입하고, 자화전류 개념인 $\frac{1}{\mu_r} \nabla \times \vec{M} = \vec{J}_m$ 을 도입하면, 식 (11)와 같은 지배 방정식을 구할 수 있다. 여기서 μ_r 은 영구자석의 비투자율이다.

$$\nabla \times \left(\frac{1}{\mu} \nabla \times \vec{A} \right) = \vec{J}_o + \vec{J}_m \quad (11)$$

3.2 System matrix

시스템 방정식은 다음과 같이 쓸 수 있다.

$$[K^{(e)}]\{A^{(e)}\} + \{F^{(e)}\} + \{M^{(e)}\} = 0 \quad (12)$$

여기서,

$$K_y^{(e)} = \frac{1}{4\Delta^{(e)}} \cdot \frac{1}{\mu^{(e)}} (c_{ie}c_{je} + d_{ie}d_{je}) \quad (13)$$

$$F_i^{(e)} = -\Delta^{(e)} \frac{Ni}{3S} \quad (14)$$

$$M_i^{(e)} = \frac{1}{\mu_0} (M_x^{(e)} d_{ie} - M_y^{(e)} c_{ie}) \quad (15)$$

이다. 따라서, 전체 모델은 식(16)와 같은 행렬로서 표현된다.

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

3.3 정특성 해석시의 입력전류

본 논문에서는 정특성 해석을 위하여 전류원 해석을 시행하였으며, 인덕턴스 및 토크 특성을 살펴보기 위해서는 입력은 적어도 1주기 이상이 지속적으로 가해져야 한다. 전류 입력은 다음과 같다.

$$i_d^e = x[A] \quad i_q^e = 0[A] \quad (17)$$

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

$$i_q^s = -i_d^e \cdot \sin(\theta + \tau) + i_q^e \cdot \cos(\theta + \tau) \quad (18)$$

$$i_a^s = i_d^s$$

$$i_b^s = -i_d^s/2 - \sqrt{3}/2 \cdot i_q^s \quad (19)$$

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

여기서 i_d^e 와 i_q^e 는 각각 d축과 q축의 회전좌표축 전류이고, i_d^s 와 i_q^s 는 텐서(tensor)변환 후의 d축과 q축의 고정좌표축 전류이다.

또한 i_a^s, i_b^s, i_c^s 는 2상을 3상으로 변환 후의 3상 고정좌표축 전류이다. i_d^e 에 값을 주고, i_q^e 를 0으로 하면, d축에 기 자력이 인가된다. 그리고 i_q^e 에 값을 주고, i_d^e 를 0으로 하면, q축에 기 자력이 인가된다.

다음과 같은 방법으로 전류를 인가하면, 각 축의 회로정수가 기기의 특성을 결정짓는 돌극형 전력 변환기기의 전류원 해석이 편리해진다.

3.4 인덕턴스 계산

PMASynRM의 경우 파라미터 중에서 인덕턴스의 값이 전류, 토크, 역률등의 특성을 결정하는 중요한 요소가 된다. 본 연구에서 정확한 인덕턴스의 값을 추출하기 위해 시행한 유한요소해석에서 각 상의 자속을 구하는 식은 다음과 같다.

$$\lambda = N \int B \cdot dS = N(A_1 - A_2)L_c \quad (20)$$

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

식 (20)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.

$$L_d = \frac{\lambda_d}{I_d}, \quad L_q = \frac{\lambda_q}{I_q} \quad (21)$$

4. 계산 알고리즘

- 1) Initial Value : 초기 시작기의 CAD 파일선처리 (Pre-processor) 작업 데이터를 작성한다.
- 2) Finite Element Analysis : 상기 기술된 유한요소법으로 전류입력 1A에서 8A까지에 대하여 d축 및 q축 자속선도 및 전류에 따른 정특성 해석을 수행한다.
- 3) Calculation of Inductance L_d and L_q : 각각의 전류에 대하여 3.4장에 기술된 방법을 이용하여 d축 및 q축 인덕턴스를 계산한다.
- 4) Computation of Inductance Ratio/Difference and Comparison : 인덕턴스 비와 차를 계산한다. 또한 적절한 전류를 인가하여 회전을 고려한 토크를 구한다.
- 5) Current change & 전류자속 밀도 변화 : 전류가 1A에서 시작하여 +1A씩 증가할 때마다 영구자석의 전류자속밀도를 각 전류에서 0.1T에서 0.4T까지 변환하여 반복 수행하며, 전류가 8A에 도달할 때까지 한다.

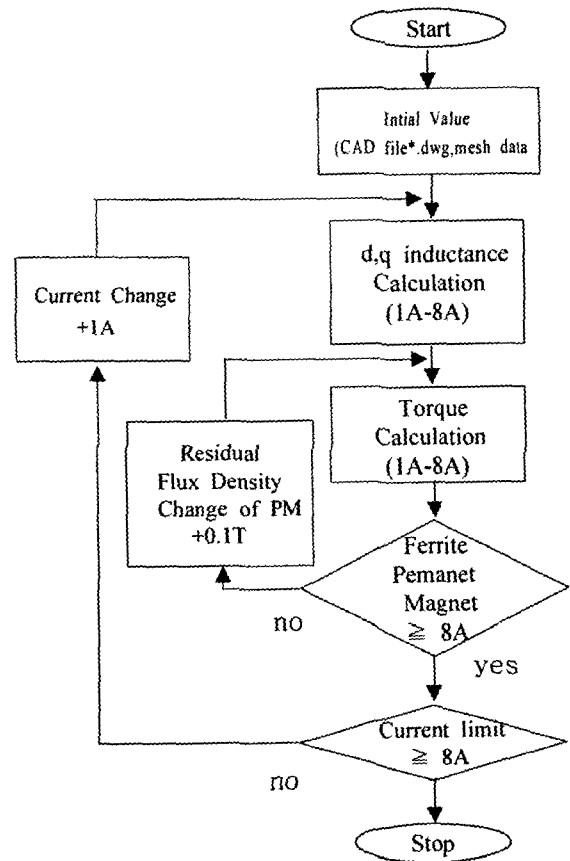


그림 4.1. 해석 흐름도
Fig. 4.1 Flow chart of Analysis

5. 설계 결과

5.1 인덕턴스와 토크

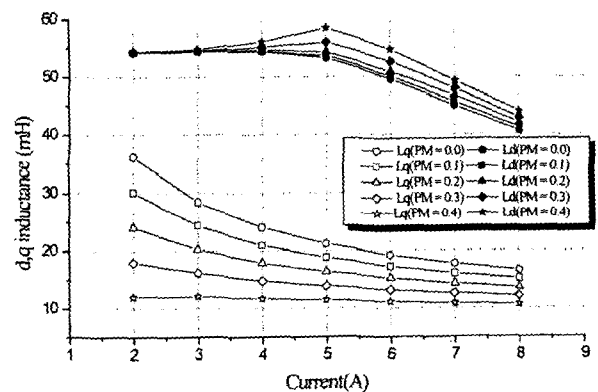


그림 5.1 전류에 따른 SynRM(0.0T)과 PMASynRM(0.1T-0.4T)의 d축, q축 인덕턴스
Fig 5.1 d and q-axis inductances of SynRM(0.0T) and PMASynRM(0.1T to 0.4T).

그림 5.1의 입력전류의 증가에 따른 d, q축 인덕턴스 성분의 변화곡선은 d축으로의 전류인가시 q축 전류는 영(zero)이며, q축으로의 전류인가시도 d축 전류는 영(zero)이다. 따라서, 상호 간섭의 영향은 무시한다.

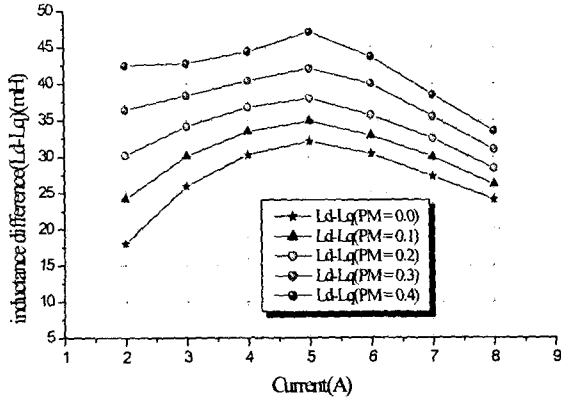


그림 5.2 SynRM(0.0T)와 PMASynRM(0.1T-0.4T)의 인덕턴스 차
Fig. 5.2 Inductance difference of SynRM(0.0T) and PMASynRM(0.1T to 0.4T).

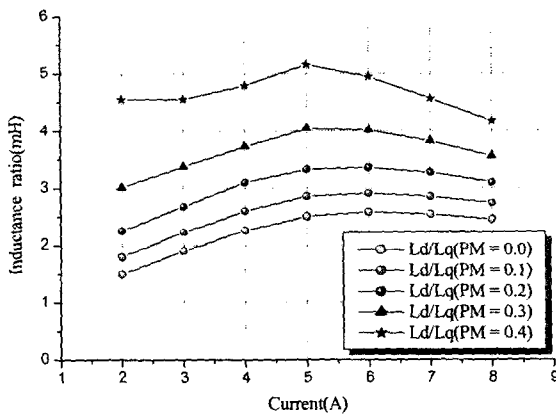


그림 5.3 SynRM(0.0T)와 PMASynRM(0.1T-0.4T)의 인덕턴스 비
Fig. 5.3 Inductance ratios of SynRM(0.0T) and PMASynRM(0.1T to 0.4T)

그림 5.1은 단편형 릴럭턴스 전동기가 가지는 일반적인 양상이며, d축 인덕턴스는 포화가 일어나면서부터 전류의 증가량에 비해 자속의 증가량이 상대적으로 적어져 감소하게 된다. 본 시작기에서는 최대 36%의 감소를 나타내었다. q축 인덕턴스는 돌극 구조의 설계 목적에 부합하여 d축 인덕턴스에 비해 적음을 알 수 있으며, d축과 마찬가지로 포화시 감소함을 알 수 있다. 그림 5.1의 입력 전류의 증가에 따른 d축과 q축 인덕턴스 성분의 변화곡선은 d축으로의 전류인가시 q축 전류는 0이며 q축으로의 전류인가시도 d축 전류는 0이다. 따라서 상호 간섭의 영향은 무시한다.

유한요소영역에서 동기형 릴럭턴스 전동기의 힘은 맥스웰 응력법에 의하여 계산되었으며, 공극부분을 3층으로 나누어 계산하고 그 평균치를 취하였다. 토크수식은 식(22)과 같다.

$$T_e = r \int_l \frac{L_c}{2\mu_0} \{ (B_x^2 - B_y^2)n_x + 2n_y B_x B_y \} dL_c \quad (22)$$

여기서 n_x, n_y : 적분경로의 단위 법선벡터
 r : 적분경로의 반경
 B_x, B_y : 공극 자속밀도의 x, y방향성분
 L_c : 고정자 코어 길이

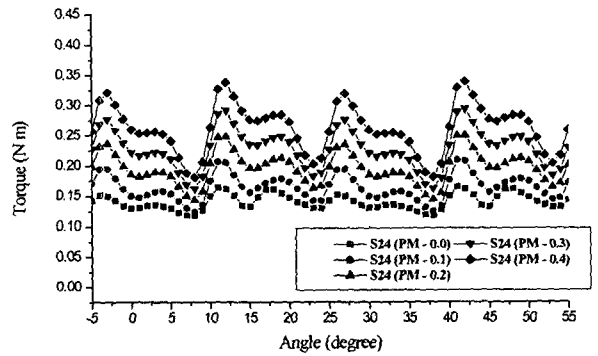


그림 5.4 SynRM(0.0T)와 PMASynRM(0.1-0.4T)의 토크특성
Fig. 5.4 Torque characteristics of SynRM(0.0T) and PMASynRM(0.1T to 0.4T).

그림 5.4에서 볼 수 있는 바와 같이 평균토크는 영구자석의 잔류 자속밀도가 증가함에 따라 상승하지만, 토크 리플도 증가함을 알 수 있다.

그러나 고폭 및 고폭출력이 확보되기 때문에 이 정도의 리플은 릴럭턴스 전동기에서는 양해정도의 선이다.

5.2 영구자석 잔류 자속밀도에 따른 시작기 특성

앞 절에서 수행한 인덕턴스 및 토크 특성 해석에서 잔류 자속 밀도가 0.4T일 때가 가장 좋은 고폭출력 특성을 나타낼 수 있었다.

따라서 시작기의 제작에 있어 영구자석의 잔류 자속밀도를 0.4T로 하여 제작하였으며, 그림 5.5의 (a)~(f)부터 그림 5.6의 (a)~(f)까지는 영구자석의 잔류 자속밀도가 0.4T일 때의 d축과 q축으로 전류를 인가하였을 경우의 자속선도 및 전류에 따른 공극 자속밀도의 변화를 보여준다.

각 그림에서 (a)는 영구자석만 인가했을 때의 자속분포를 보여주며, (b)는 각각의 전류만 인가했을 때의 자속분포이다. (c)는 동시에 인가했을 때의 자속분포를 보여준다. 그리고 (d)는 (a)의 경우 공극 자속밀도이며, (e)는 (b)의 경우 공극 자속 밀도이고, (f)는 (c)의 경우 공극 자속밀도이다. d축 기자력인 가시 그림 (f)에서 볼 수 있는 바와 같이 거의 영구자석의 영향을 받지 않는 것을 볼 수 있으며, 반면에 q축 기자력 인가 시 q축 자속은 영구자석에 의해 반발됨을 알 수 있다.

그림 (a)는 공기로 구성된 자속장벽에 의해 영구자석의 반발자속이 공극에서 적게 나타날 수밖에 없음을 보여준다. 따라서 높은 돌극비를 내기위해서 페라이트로서 최대로 낼 수 있는 0.4T가 적절함을 알 수 있다

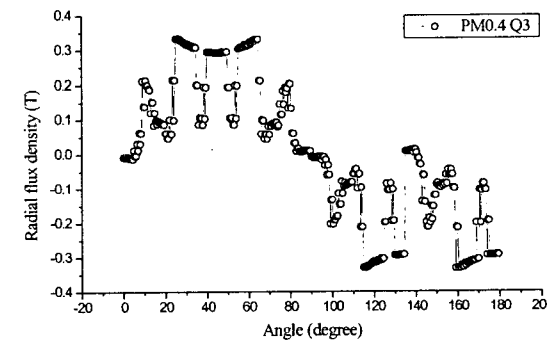
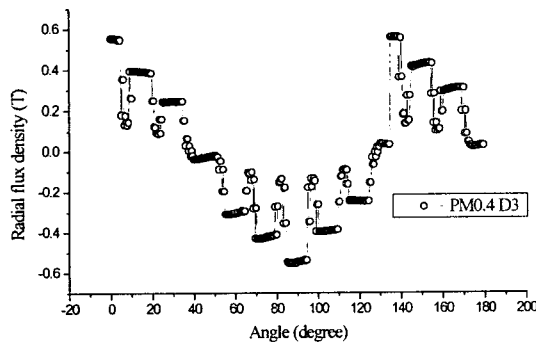
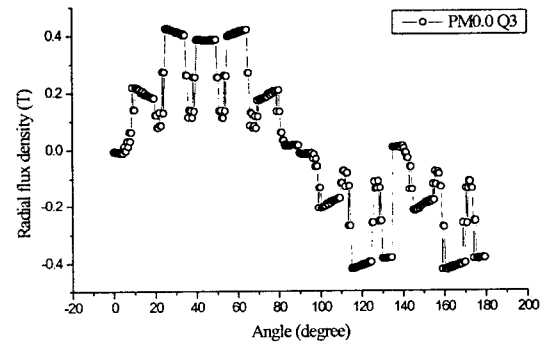
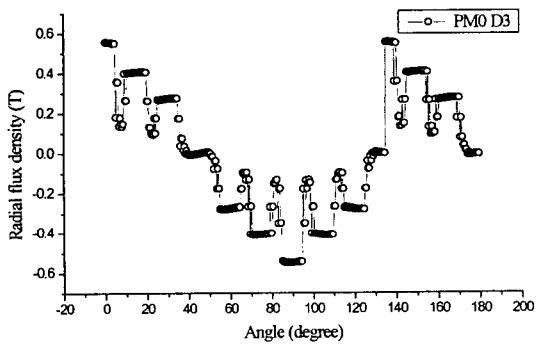
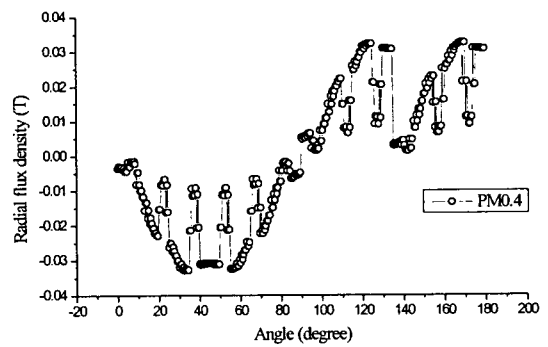
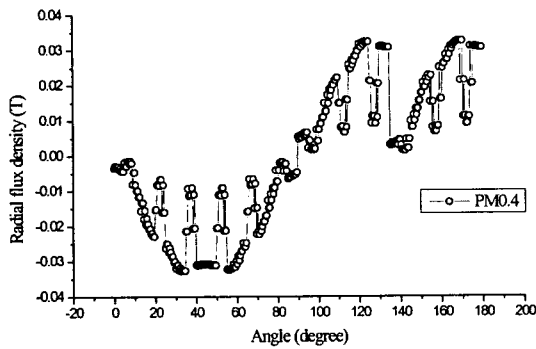
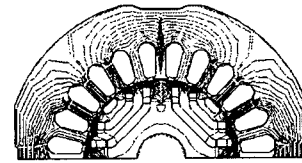
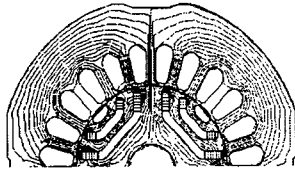
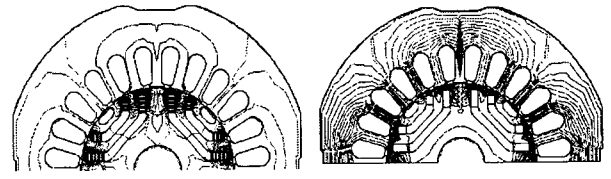
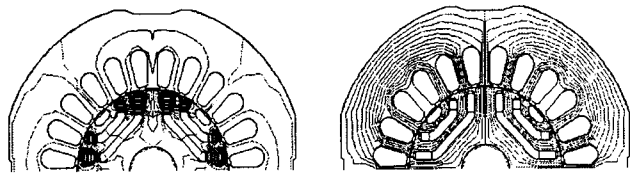


그림 5.5 d축전류 3A와 PM0.4 인가시 공극 자속밀도
Fig. 5.5 Air-gap flux density of PM0.4T and d-axis current 3A.

그림 5.6 q축전류3A와 PM0.4 인가시 공극자속밀도
Fig. 5.6 Air-gap flux density of PM 0.4T and q-axis current 3A.

6. 실험을 통한 특성분석

6.1 실험 시스템 구성

제안된 방법의 정밀성 및 타당성을 검증하기 위하여 그림 6.1과 같은 실험 시스템을 구성하여 실험을 하였다. 본 시스템에서는 부동소수점 연산이 가능한 Texas Instrument사의 TMS320C31 DSP를 이용해서 실시간 처리를 위한 제어보드를 구성하였으며 A/D, D/A, Hall-CT 등을 사용해 센싱된 모든 값 들은 디지털 처리된다. 전력회로는 다이오드 정류부, DC링크 커패시터, 3상 PWM 인버터부로 이루어지며 스위칭 소자로는 IPM을 사용하였다.

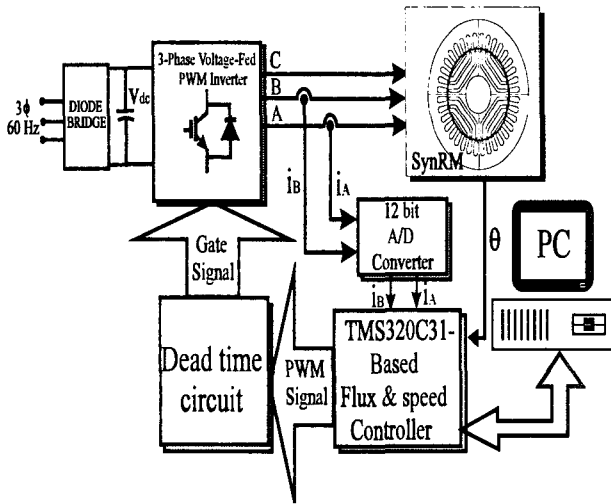


그림 6.1 실험 장치 구성도
Fig. 6.1 Experimental system configuration.

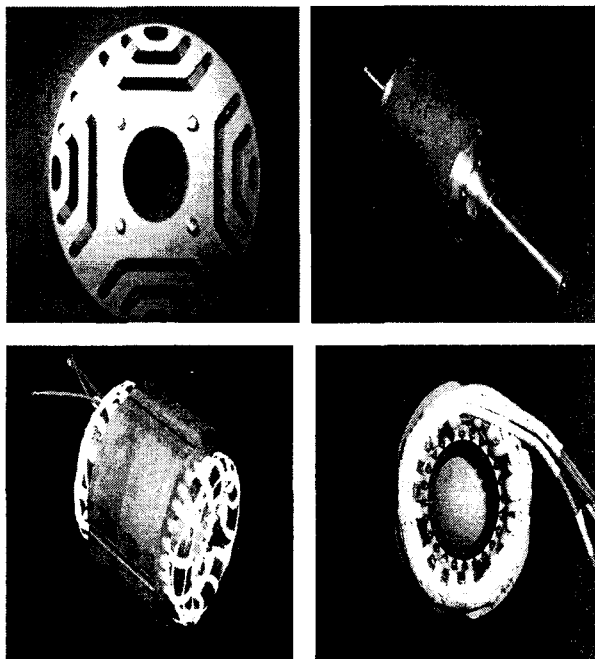


그림 6.2 PMASynRM의 회전자와 고정자
Fig. 6.2 The Stator and Rotor Prototype of PMASynRM

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

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

상전류 검출에 사용된 Hall-CT는 NNC-20CAW를 사용하였으며, 두 상전류를 전압의 형태로 검출하여 A/D 변환기를 거쳐 DSP에서 필요한 디지털 정보로 사용하였다. 이때 사용된 CT는 100A 당 4V의 출력을 발생하기 때문에 전류검출의 해상도를 높이기 위해 10회 감아서 10A당 4V를 얻게 하였다. 그림 6.2은 PMASynRM의 회전자와 고정자를 보여주고 있다..

6.2 실험 결과 및 고찰

앞에서 실험 시스템을 구성하여 실험한 결과를 나타내면 다음과 같다.

실험은 d축 전류를 2.5A로 일정하게 한 후 1000rpm, 2000rpm, 3000rpm, 3600rpm(SynRM의 정격속도)에서 각각 부하를 상승시켜 가면서 수행하였다. 입력은 인버터단에서 나온 전동기 입력이고, 이때 발생 q축 전류와 상전류를 측정하였다. 또한 출력은 다이내모미터에서 측정된 값이며, 이를 토대로 전류각과 효율을 계산하였다.

그림 6.3에서 그림 6.6까지는 각 rpm에서 두 전동기의 효율특성 및 그때 부하각을 보여준다. 일반적 동기기만을 살펴보면, 정격 340W, 3600rpm으로 설계된 것으로 3600 rpm에서 부하 9kg-cm부근에서 최대효율이 나오는 것을 알 수 있다. 다음으로 이 전동기에 영구자석을 매입했을 때의 전동기 특성을 분석해보면, 이때, 각각의 부하에서의 전류각 변화를 그림 6.7부터 그림 6.10까지 나타내었다.

그림 6.7부터 그림 6.10까지에서 볼 수 있는 바와 같이 일반 동기 릴럭턴스 전동기 최대효율점 이전에서는 수학적 모델링에서 설명한 바와 같이 영구자석의 매입으로 인하여 영구자석 매입형 동기 릴럭턴스 전동기의 전류각이 일반 동기 릴럭턴스 전동기보다 더 높은값에서 운전됨을 알 수 있다. 반면, 최대 효율지점을 지나 고부하로 가면 갈수록 전류각의 크기가 역전되는 것을 알 수 있다. 이는 인덕턴스의 포화현상으로 인한 것으로 설명할 수 있다. 그림 6.11부터 그림 6.13까지는 각각 부하에 따른 입력전류 및 전류각을 보여준다.

그림들에서 볼 수 있는 바와 같이 최대효율지점을 지나면영구자석 매입형 동기 릴럭턴스 전동기의 입력전류가 상승함을 볼 수 있다. 또한 영구자석 매입형 동기 릴럭턴스 전동기의 최대효율지점이 뒤로 이동됨을 알 수 있다.

이는 그림 5.2에서 볼 수 있는 바와 같이 고부하 영역(3A~4A)으로 가면 갈수록 전류가 증가하여, q축 인덕턴스를 포화 시켜 인덕턴스의 차를 변화시키기 때문이다.

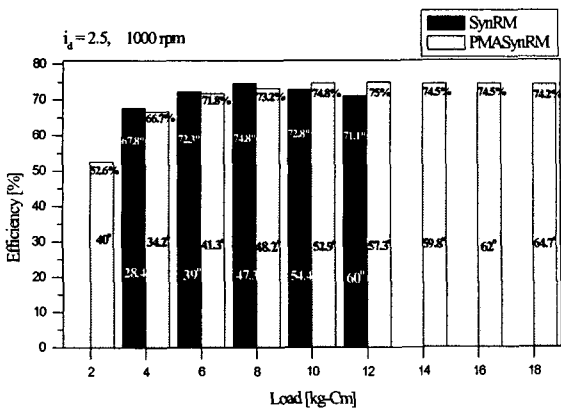


그림 6.3 1000rpm에서의 SynRM과 PMASynRM의 부하각 특성과 효율
 Fig. 6.3 Efficiency and load angle characteristics of SynRM and PMASynRM at 1000rpm.

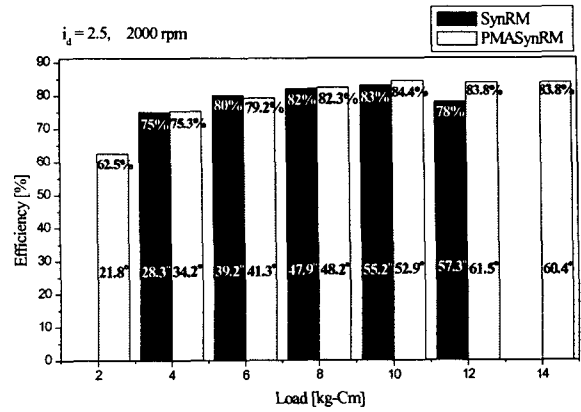


그림 6.4 2000rpm에서의 SynRM과 PMASynRM의 부하각 특성과 효율
 Fig. 6.4 Efficiency and load angle characteristics of SynRM and PMASynRM at 2000rpm.

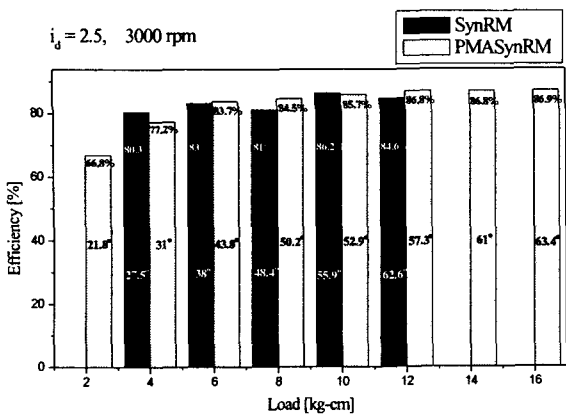


그림 6.5 3000rpm에서의 SynRM과 PMASynRM의 부하각 특성과 효율
 Fig. 6.5 Efficiency and load angle characteristics of SynRM and PMASynRM at 3000rpm.

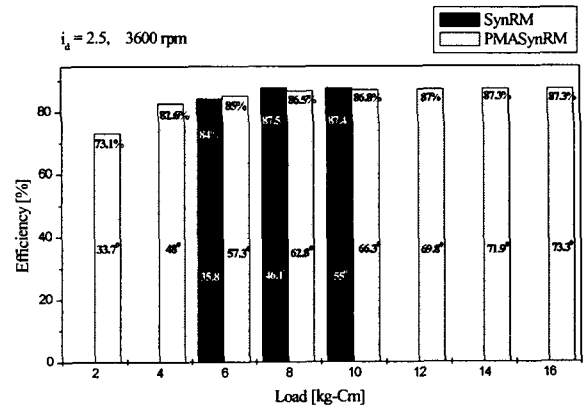


그림 6.6 3600rpm에서의 SynRM과 PMASynRM의 부하각 특성과 효율
 Fig. 6.6 Efficiency and load angle characteristics of SynRM and PMASynRM at 3600rpm.

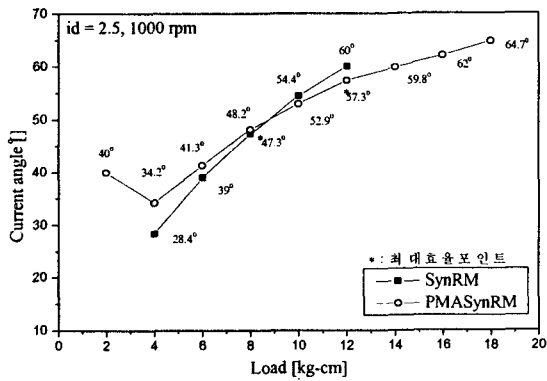


그림 6.7 1000rpm에서의 부하각과 최대 효율점
 Fig. 6.7 Load angle and maximum efficiency point at 1000rpm.

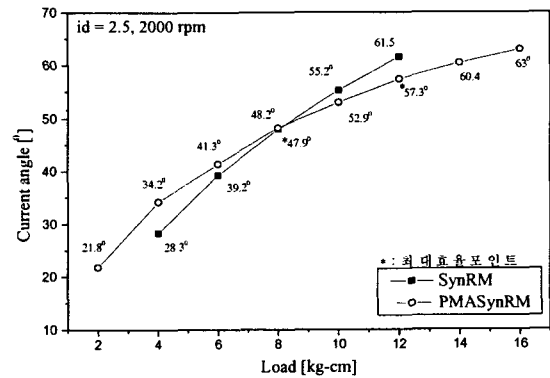


그림 6.8 2000rpm에서의 부하각과 최대 효율점
 Fig. 6.8 Load angle and maximum efficiency point at 2000rpm.

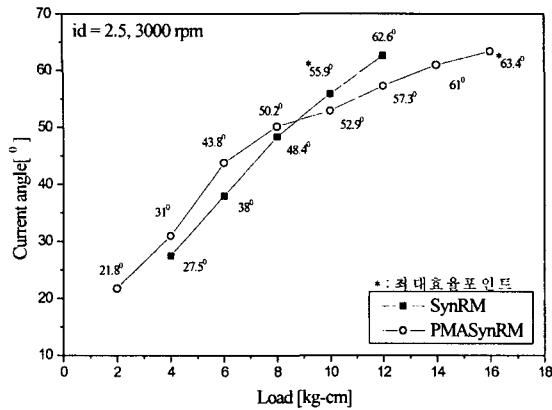


그림 6.9 3000rpm에서의 부하각과 최대 효율점
Fig. 6.9 Load angle and maximum efficiency point at 3000 rpm.

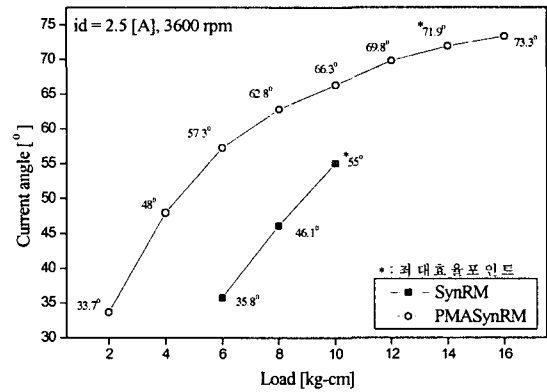


그림 6.10 3600rpm에서의 부하각과 최대 효율점
Fig. 6.10 Load angle and maximum efficiency point at 3600rpm.

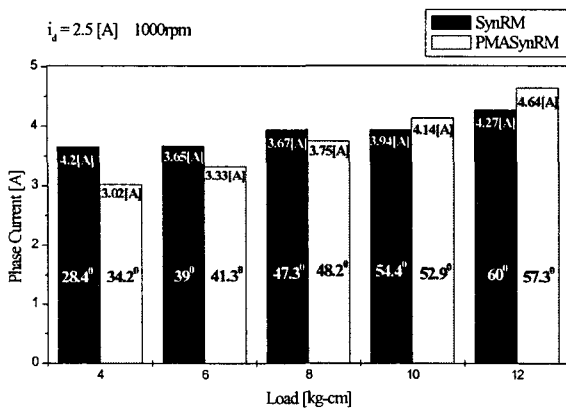


그림 6.11 1000rpm에서의 전류 특성
Fig. 6.11 Current characteristics at 1000rpm

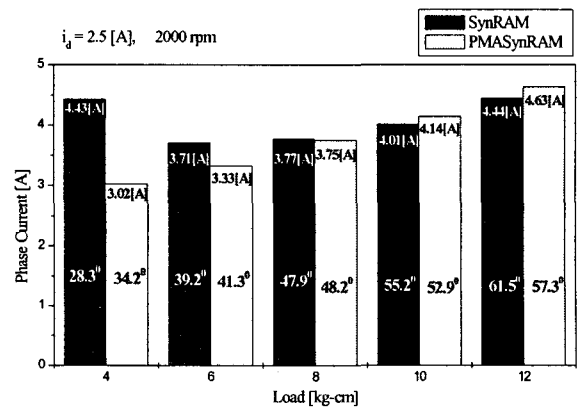


그림 6.12 2000rpm에서의 전류 특성
Fig. 6.12 Current characteristics at 2000rpm.

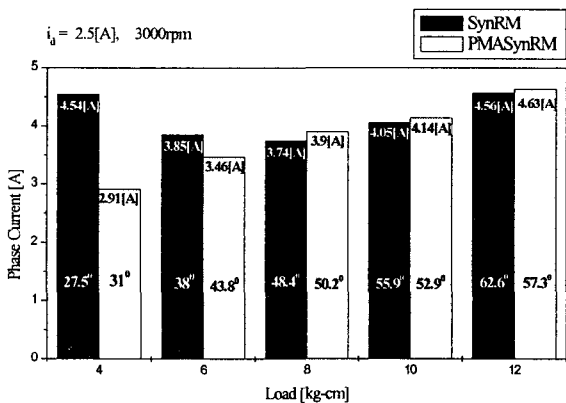


그림 6.13 3000rpm에서의 전류 특성
Fig. 6.13 Current characteristics at 3000rpm.

영구자석 매입형 동기 릴럭턴스 전동기는 q축 인덕턴스의 변화가 거의 없어서 인덕턴스의 차는 크게 변하지 않는 반면, 일반 동기 릴럭턴스 전동기는 q축 인덕턴스의 큰 폭 감소로 오히려 인덕턴스의 차가 증가하는 경향이 있다. 물론 전류값이 6A 이상이 되면 두 전동기 모두 인덕턴스의 차를 감소시키는 경향이 있지만, 본 논문의 실험에서는 고전류 영역은 해당되지 않는다.

따라서 인덕턴스차의 증가로 인해 동일 주파수, 동일 출력에서 오히려 일반 동기 릴럭턴스 전동기의 전류값은 감소하게 된다. 그림 6.14부터 그림 6.19까지는 각 rpm별, 부하별 전류각 특성 및 상전류 응답특성을 보여준다. 전류 응답특성은 앞서 설명한 바와 같으며, 여기서 중요한 또다른 한가지의 특성을 파악할 수 있다.

일반 동기 릴럭턴스 전동기는 부하각의 급한 변동으로 영구자석 매입형 동기 릴럭턴스 전동기보다 부하 12kg-cm 부근에서 빠르게 탈조에 이르는 현상을 볼 수 있다. 반면, 영구자석 매입형 동기 릴럭턴스 전동기는 최대토크값 이후 고부하 영역에서도 동작함을 알 수 있다.

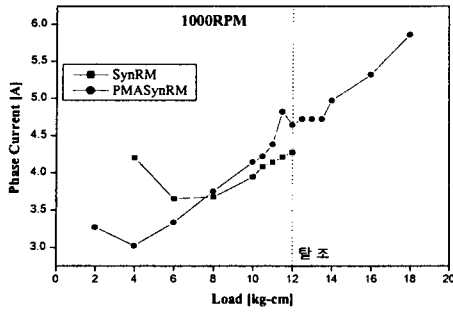


그림 6.14 1000rpm에서의 전류 특성
Fig. 6.14 Current characteristics at 1000rpm

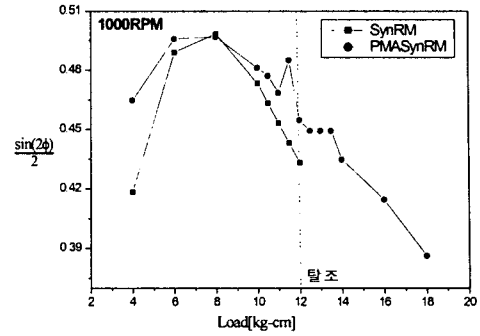


그림 6.15 1000rpm에서의 $\frac{\sin(2\phi)}{2}$ 특성
Fig. 6.15 $\frac{\sin(2\phi)}{2}$ characteristics at 1000rpm

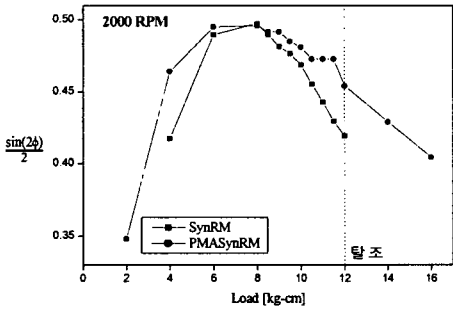


그림 6.16 2000rpm에서의 전류 특성
Fig. 6.16 Current characteristics at 2000rpm

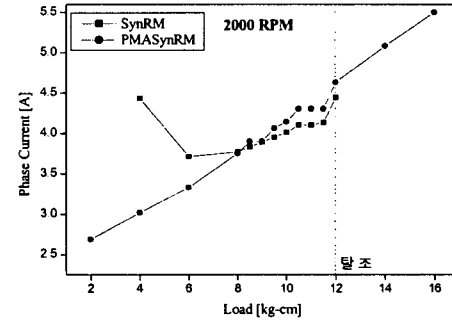


그림 6.17 2000rpm에서의 $\frac{\sin(2\phi)}{2}$ 특성
Fig. 6.17 $\frac{\sin(2\phi)}{2}$ characteristics at 2000rpm

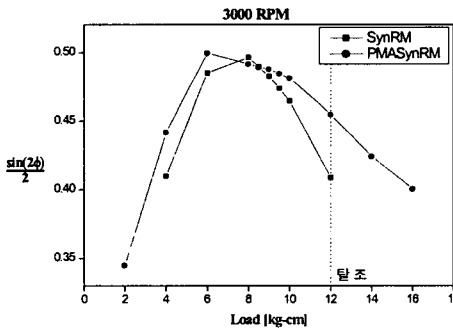


그림 6.18 3000rpm에서의 전류 특성
Fig. 6.18 Current characteristics at 3000rpm

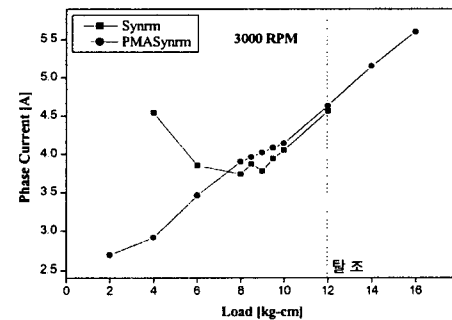


그림 6.19 3000rpm에서의 $\frac{\sin(2\phi)}{2}$ 특성
Fig. 6.19 $\frac{\sin(2\phi)}{2}$ characteristics at 3000rpm

이는 2.1장에서 설명한 반발자속의 영향으로 역기전력이 감소하여 허용 전류값이 상승함으로서 고부하 영역에서 출력을 낼 수 있음을 나타낸다.

영구자석 매입형 동기 릴럭턴스 전동기는 약 17kg-cm에서 탈조되며, 따라서 고효율 범위가 정격 3600rpm에서 최대 70%가 일반 주파수에서는 약 30% 상승됨을 실험값을 통해 확인되었다. 그림 6.6은 일반 동기 릴럭턴스 전동기에서는 2.5A의 d축 전류, 영구자석 매입형 동기 릴럭턴스 전동기에서는 1.8A의 약계자 영역으로 운전하였다. 따라서 전류값 및 전류값 비교는 생략하였다.

따라서 제안된 시스템을 구성하여 실험을 통한 실험결과 데이터를 비교 분석하면 그림 6.20과 그림 6.21와 같은 일반적인 영구자석 매입형 동기 릴럭턴스 전동기의 부하에 따른 전류값과 전류특성을 얻을 수 있다.

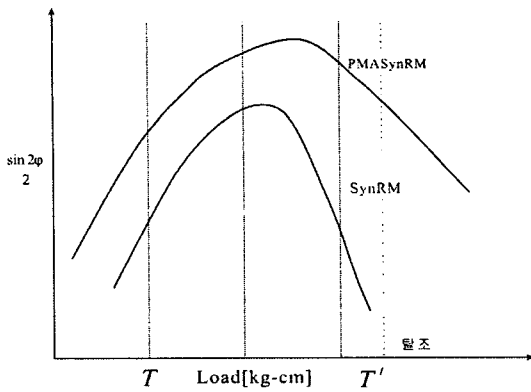


그림 6.20 SynRM과 PMASynRM의 $\frac{\sin(2\phi)}{2}$ 특성

Fig. 6.20 $\frac{\sin(2\phi)}{2}$ characteristics of PMASynRM and SynRM.

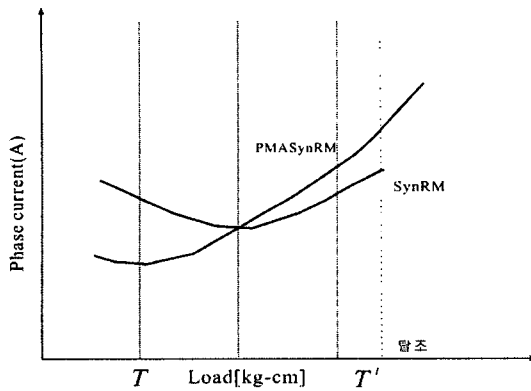


그림 6.21 PMASynRM과 SynRM의 일반화된 전류 특성곡선
Fig. 6.21 Current characteristics of PMASynRM and SynRM.

7. 결 론

본 논문은 동기 릴럭턴스 전동기의 q축 인덕턴스를 감소시켜 토크밀도 및 역률을 개선하기 위해서 영구자석의 자로를 q축 자속의 반대방향으로 삽입한 영구자석 매입형 동기 릴럭턴스 전동기를 해석대상으로 유한요소법을 이용하여 포화의 영향을 고려한 특성분석을 수행하였고, 시작기를 제작하고 실험을 통해 일반 동기 릴럭턴스 전동기와 비교를 수행하였다.

본 논문에서 제안한 영구자석 매입형 동기 릴럭턴스 전동기의 특성해석 및 시작기 특성을 요약하면 다음과 같다.

영구자석 매입형 동기 릴럭턴스 전동기의 유한요소해석에 있어서 인덕턴스 특성 및 토크특성 분석을 각각의 잔류 자속 밀도량(0.1T~0.4T)에 따라 수행하였다. 제안된 수치기법에서는 이동메쉬 개념의 요소 재분할법이 사용되었다. 일반 동기 릴럭턴스 전동기의 최적 설계과정을 통해 토크 및 역률에 영향을 미치는 d축과 q축 인덕턴스를 크게 되도록 하기 위하여, K_w 의 값을 리베팅 볼트의 삽입 등 제작여건을 고려하여 0.8로 결정해서 회전자 단편을 설계하였다. 그리고 유한요

소 특성해석을 통하여 적절한 영구자석 잔류 자속밀도 0.4T를 결정하였고, q축에 반발되도록 제안한 이론에 근거하여 삽입 회전자를 제작하였다.

그리고 영구자석 매입형 동기 릴럭턴스 전동기의 실험결과 및 특성을 요약하면 다음과 같다.

일반 동기 릴럭턴스 전동기 최대효율 이전에서 영구자석의 매입으로 인하여 영구자석 매입형 동기 릴럭턴스 전동기의 전류각은 일반 동기 릴럭턴스 전동기보다 더 높은값에서 운전됨을 알 수 있었다. 반면, 최대효율 지점을 지나 고부하로 가면 갈수록 전류각의 크기가 역전되는 것을 알 수 있다. 이는 고부하영역(3A~4A)으로 가면 갈수록 전류가 증가하여, q축 인덕턴스를 포화시켜 인덕턴스의 차를 변화시키기 때문이다.

영구자석 매입형 동기 릴럭턴스 전동기는 q축 인덕턴스의 변화가 거의 없어서 인덕턴스의 차는 크게 변하지 않는 반면, 일반 동기 릴럭턴스 전동기는 q축 인덕턴스의 큰 폭 감소로 오히려 인덕턴스의 차가 증가하는 경향이 있다.

따라서 인덕턴스의 차가 증가함으로 인해 동일 주파수, 동일 출력에서 오히려 일반 동기 릴럭턴스 전동기의 전류값은 감소하게 된다. 일반 동기 릴럭턴스 전동기는 부하각의 급격한 변동으로 영구자석 매입형 동기 릴럭턴스 전동기보다 부하 12kg-cm 부근에서 빠르게 탈조에 이르는 현상을 볼 수 있다. 그러나 영구자석 매입형 동기 릴럭턴스 전동기는 최대효율값 이후 고부하 영역에서도 동작함을 알 수 있다. 이는 반발자속의 영향으로 역기전력이 감소하여 허용 전류값이 상승함으로서 고부하 영역에서 출력을 낼 수 있음을 나타낸다.

영구자석 매입형 동기 릴럭턴스 전동기는 약 17kg-cm에서 탈조되며, 따라서 고출력 범위가 정격 3600rpm에서 최대 70%가 일반 주파수에서는 약 30% 상승됨을 실험값을 통해 확인되었다.

끝으로 본 논문에서 제안한 영구자석 매입형 동기 릴럭턴스 전동기의 고출력 고성능 특성이 유한요소해석과 실험을 통해 확보되었다. 이러한 특성곡선을 적절히 이용하면 부하별, 용량별 설계기준이 될 수 있으며, 이는 고출력 전동기를 필요로 하는 분야 또는 응용분야에 유도기 및 BLDC 전동기의 대체용으로 적합할 것으로 사료된다.

감사의 글

본 연구는 2003년도 산자부 주관 전력산업 연구개발 사업(기초 전력 공동연구소:과제번호 R-2003-B-282)의 지원 및 한밭대학교 교내학술연구비의 지원에 의하여 이루어진 연구로서, 관계부처에 감사 드립니다.

참 고 문 헌

- [1] M. J. Kamper, A. F. Volshenk, July 1994, Effect of rotor dimensions cross magnetization on Ld and Lq inductances of reluctance synchronous machine with cageless flux barrier rotor, IEE. Proc.-Power Appl., Vol. 141(4), 213-220.

- [2] 이중호, 김정철, 현동석, 1998. 9, 단편형 회전자구조 동기형 릴럭턴스 전동기와 유도전동기의 특성비교에 관한 연구, 대한 전기학회논문지, 제47권(제9호): 1343-1350.
- [3] 이중호, 현동석, 1998. 8, 유한요소법을 이용한 단편형 회전자 구조 동기형 릴럭턴스 전동기의 특성해석, 대한 전기학회 논문지, 제47권(8호) : 1116-1122.
- [4] 장석명, 박병임, 이성호, 이중호, 2001. 6, 단편형 동기 릴럭턴스 전동기의 토크 및 역률 개선을 위한 회전자 설계, 대한전기학회 논문지, 제50권(6호) : 263-272
- [5] 이중호, 2003. 2, 가전용 340W급 동기형 릴럭턴스 전동기 설계 및 효율특성 실험, 대한전기학회 논문지, 제52권(2호) : 39-52
- [6] J. H. Lee, D. S. Hyun, May 1999, Hysteresis Analysis for the Permanent Magnet Assisted Synchronous Reluctance Motor By Coupled FEM & Preisach Modelling, IEEE Trans. on Magn., Vol. 35(5) : 1195-1198.
- [7] J. H. Lee, J. C. Kim, D. S. Hyun, May 1999, Effect of Magnet on Ld and Lq Inductance of Permanent Magnet Assisted Synchronous Reluctance Motor, IEEE Transaction on Magnetics., Vol. 35(5) : 1199-1202
- [8] J. H. Lee, J. C. Kim, D. S. Hyun, Sep 1998, Dynamic Characteristic Analysis of Synchronous Reluctance Motor Considering Saturation and Iron Loss by FEM, IEEE Transaction on Magnetics, Vol. 35(5) : 2629-2632



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(공박). 1999년 9월~2000년 2월 한양대학교 부설 산업과학연구소 선임연구원. 2000년 3월~2002년 2월 독립충북과학대학 전기과 전임강사. 2002년 3월~현재 국립한밭대학교 전기공학과 부교수
Tel : 042-821-1098, Fax : 042-821-1088
E-mail : limotor@hanbat.ac.kr



김 상 길(金相吉)

1962년 1월 2일생. 1991년 대전공업대 전기공학과 졸업. 1995년 충남대 대학원 전기공학과 졸업(석사). 2004년 경상대학교 대학원 졸업(공박). 1996.2~1998.2 홍성기능대 전임강사, 1998.3~2002.12 거창기능대 조교수, 2003년~현재 대전기능대학 전기계측제어과 부교수로 근무
Tel : 042 -670-0568
E-mail : ksanggil@kopo.or.kr



신 흥 교(辛興敎)

1980년 한양대 전기공학과 졸업. 1982년 동 대학원 전기공학과 졸업 (석사). 1990년 동 대학원 전기공학과 졸업 (공박). 1987~1988 한양대 전기공학과 강사. 1988~현재 경상대학교 전기전자공학부 교수. 1988~현재 공학연구원 책임 연구원.
Tel. : 055-751-5346, Fax. : 055-759-2723
E-mail : hkshin@nongae.gsnu.ac.kr

저 자 소 개



장 영 진(張永珍)

1978년 3월 4일생. 2004년 한밭대학교 전기공학과 졸업. 현재 동 대학원 전기공학과 석사과정
Tel : 042-821-1625
E-mail : jyj6936@naver.com



김 기 복(金琪復)

1977년 04월 11일생. 2003년 한밭대학교 전기공학과 졸업. 현재 동 대학원 전기공학과 석사과정
Tel : 042-821-1625
E-mail : sukgb@naver.com