

Characteristic of High Speed Synchronous Reluctance Motor(SynRM)

洪定杓[†] · 周秀元^{*} · 韓聲鎭^{*} · 具大鉉^{**}
 (J. P. Hong · S. W. Joo · S. C. Hahn · D. H. Koo)

Abstract - This paper presents characteristics of SynRM(Synchronous Reluctance Motor) that is compared with a high speed induction motor. SynRM is much suitable for high speed electric machines because of structural robustness. There are many kinds of SynRM according to the shape of rotors. Particularly, axially laminated anisotropic (ALA) rotor is suitable for high speed instruments. Characteristics of SynRM with ALA rotor is obtained from a governing voltage and torque equation mainly composed of d-axis and q-axis inductance that will be identified with finite element method.

Key Words : Synchronous Reluctance Motor, High Speed, Axially Laminated Anisotropic(ALA), Centrifugal Force

1. 서 론

최근 전동시스템의 소형화 및 고출력형을 목적으로 고속전동기에 대한 많은 연구와 개발이 이루어지고 있으며, 대부분 유도전동기와 BLDC 전동기가 고속전동기에 적용되고 있어 성능적인 면에서 우수함을 보이고 있다. 한편, 유도전동기는 제작이 용이하다는 이점 때문에 많은 분야 적용되어 왔으나 고속전동기에 적용할 경우 원심력으로 인한 회전자 치의 변형과 전자기 유도로 인한 회전자 농형도체의 발열이 문제가 되며, BLDC 전동기는 고속시 회전자 표면에 붙어있는 자석을 원심력으로부터 보호하기 위해 캔 형태의 비자성체를 회전자에 씌워야 하고 전동기내부의 온도가 높아질 경우 영구자석의 감자현상으로 전동기의 성능저하를 초래할 수 있는 단점을 가지고 있다. 따라서 본 논문에서는 위의 문제점을 해결하는 방법으로 축방향 성층 이방성(ALA; Axially Laminated Anisotropic) 회전자[1]-[5]를 가진 SynRM을 제안하고자 한다.

SynRM 특성은 FEM(Maxwell 2D)을 이용해 직축과 횡축의 인덕턴스를 구한 후, SynRM의 전압방정식과 토크식에 대입하여 전류특성 및 토크특성을 계산하여 동일한 크기의 유도전동기 모델과 비교분석할 것이다.

2. SynRM의 특성

2.1 ALA 회전자형 SynRM

그림 1은 ALA 회전자형 SynRM의 단면이다. 고정자 모양은 일반 유도전동기나 동기전동기와 같고 회전자는 자성체와 비자성체 평판을 교번으로 축방향 적층한 것이다. ALA 회전자형 SynRM은 성능적인 면에서 다른 전동기에 뒤지지 않으며 구조적으로 견고하여 인버터를 이용한 고속운전에 적합한 것으로 인정받고 있다. 그러나 고속운전시 발생할 수 있는 구조적인 문제를 고려하여야 한다. 기존의 ALA 회전자는 얇은 판을 겹쳐서 회전자를 구성하였으나 이는 고속회전시 원심력으로 접판들이 서로 분리되거나 얇은 판은 변형이 일어날 수 있기 때문이다.

따라서 고속회전을 위해서는 자성체와 비자성체의 각층을 가능한 두껍게 하여 회전자 강도를 높이고, 접판과 접합면의 수를 줄여서 경납땜(브레이징) 가공이 용이하도록 하여야 한다.

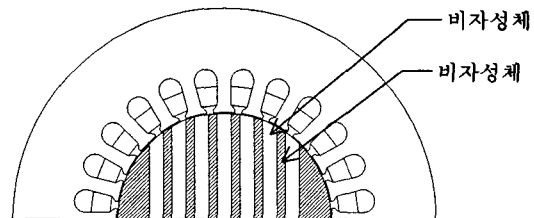


그림 1 SynRM 단면도
 Fig. 1 Cross section of SynRM

2.2 SynRM의 이론식

2극의 3상 SynRM은 그림 2와 같이 3상의 고정자와 d-q로 표시된 회전자로 표현할 수 있다. 이때 θ_r 은 고정자

† 교신저자, 正會員 : 東亞大學校 電氣學科 博士課程
 E-mail : hjp5000@keri.re.kr

* 正會員 : 東亞大學校 電氣學科 教授 · 工博
 ** 正會員 : 韓國電氣研究院 責任研究員, Group長
 接受日字 : 2006年 1月 10日
 最終完了 : 2006年 3月 23日

a 상과 회전자의 횡축이 이루는 각이고, ω_r 는 회전자의 각 속도이다.

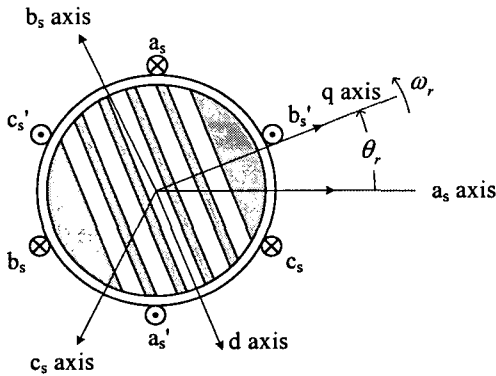


그림 2 축방향 성층 이방성(ALA) 회전자를 가지는 SynRM
Fig. 2 SynRM with axially laminated anisotropic (ALA) rotor

2.2.1 전압방정식

그림 3을 통해 SynRM의 전압 방정식을 구하면 일반 교류 동기기의 전압 방정식과 유사하게 얻어진다. 그러나 SynRM은 계자 전류가 없으므로 회전자에 관한 전압 방정식이 없다. 따라서 고정자에 대한 전압 방정식만이 존재하여 식(1)과 같이 정의된다.

$$v_{abc} = r_s i_{abc} + p\lambda_{abc} \tag{1}$$

식(1)을 d-q 변환을 하면 식(2)와 같다.

$$v_{qd0} = r_s i_{qd0} + p\lambda_{qd0} + \omega\lambda_{dq} \tag{2}$$

식(2)를 이용하여 SynRM의 페이저도를 그리면 그림 3과 같이 그릴 수 있으며, 그림 3으로부터 식(2)를 다시 정리하면 정상상태의 직축과 횡축 전압방정식이 아래와 같이 유도된다.

$$\begin{aligned} V_q &= V\sqrt{2} \cos \delta = R_s I_q + \omega L_d I_d \\ V_d &= V\sqrt{2} \sin \delta = R_s I_d - \omega L_q I_q \end{aligned} \tag{3}$$

식(3)을 직축과 횡축 전류(I_d , I_q)에 관해 전개하면 각 전류값을 구해낼 수 있다.

$$\begin{aligned} I_d &= \frac{V\sqrt{2}(R_s \sin \delta + \omega L_q \cos \delta)}{R_s^2 + \omega^2 L_d L_q} \\ I_q &= \frac{V\sqrt{2}(R_s \cos \delta - \omega L_d \sin \delta)}{R_s^2 + \omega^2 L_d L_q} \end{aligned} \tag{4}$$

2.2.2 토크방정식

직축과 횡축 인덕턴스와 전류를 다음의 토크식에 대입하면 SynRM의 토크를 구할 수 있다.

$$\begin{aligned} T_e &= \left(\frac{3}{2}\right)\left(\frac{P}{2}\right)(\lambda_d I_q - \lambda_q I_d) \\ &= \left(\frac{3}{2}\right)\left(\frac{P}{2}\right)(L_d - L_q)I_d I_q \end{aligned} \tag{5}$$

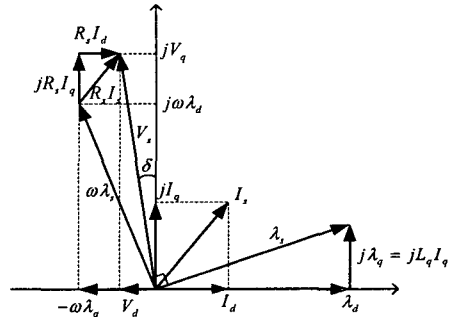


그림 3 SynRM의 페이저도
Fig. 3 Phasor diagram of SynRM

2.3 SynRM의 인덕턴스

SynRM의 특성을 구하기 위해서는 직축과 횡축 인덕턴스를 구하고, 치 사이와 공극에서 발생하는 누설인덕턴스와 엔드권선에서 발생하는 인덕턴스를 구해야 한다. 누설인덕턴스 성분은 비고대상인 유도전동기와 같은 고정자를 적용하는 것으로 가정할 때 유도기와 같은 값을 가지며, 공극 누설자석은 무시한다.

직축과 횡축 인덕턴스는 그림 4와 같이 두가지 경우로 표현되며, 그림 4.(a)와 같이 수평으로 자계가 형성되었을 때의 인덕턴스를 직축 인덕턴스라 하며, 그림 4.(b)와 같이 수직으로 형성되었을 때의 인덕턴스를 횡축 인덕턴스라고 한다.

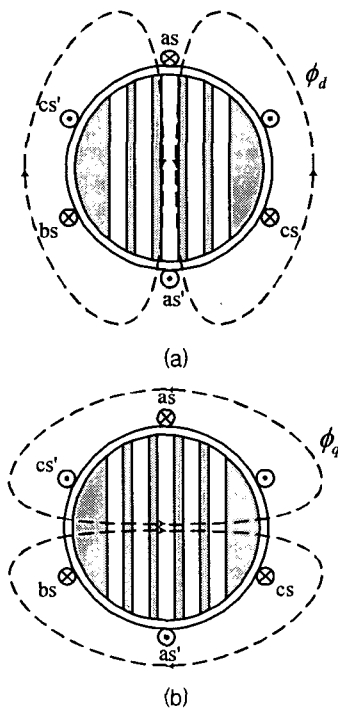


그림 4 회전자 위치에 대한 직·횡축 자속 흐름도
Fig. 4 D-axis and Q-axis flux pattern for rotor position

2.4 초고속 유도전동기 비교사양

아래의 유도전동기 모델은 SynRM 과의 특성비교를 위해 고속용으로 설계된 것이다. 본 유도전동기 모델을 이용하여 SynRM 의 모델을 결정하고 같은 채적을 가질 경우를 가정하여 그 특성을 비교하고자 한다. 유도전동기에 대한 사양은 표 1과 같다.

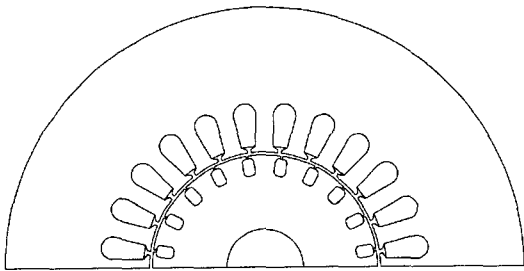


그림 5 고속 유도전동기의 단면도
Fig. 5 Cross section of high speed induction motor

표 1 고속용 유도전동기의 사양
Table 1 Specification of high speed induction motor

구분	값
고정자 외경	270 mm
고정자 내경	120 mm
회전자 외경	117 mm
회전자 적층길이	147 mm
공극길이	1.5 mm
용량	100 kW
극수	2 Pole
회전수	30,000 rpm
토크	32 Nm

2.5 SynRM 해석모델

SynRM 의 해석모델은 2.3절의 유도전동기와 같은 고정자를 사용하고, 회전자는 자성체와 비자성체를 축방향으로 적층한 것으로 그림 6 과 같다. 자성체 폭은 비자성체 폭의 2배로 하여 표 2 와 같이 6 개 모델을 정하여 각 모델에 대한 직축과 횡축의 인덕턴스를 유한요소법을 이용하여 구하고 SynRM 의 전압방정식과 토크식에 대입하여 전류특성 및 토크특성을 계산하여 동일한 크기의 유도전동기 모델과 비교한다.

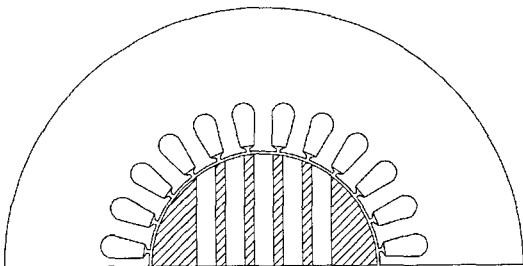


그림 6 SynRM 의 해석 모델 단면도
Fig. 6 Cross section of analysis model(SynRM)

표 2 회전자 적층폭에 따른 해석모델 사양

Table 2 Dimension of analysis model according to laminated width in the rotor

모델 구분	회전자 적층폭		회전자 적층수		회전자 측면 비자성체 영역 높이 [mm]
	자성체 [mm]	비자성체 [mm]	자성체 [mm]	비자성체 [mm]	
I	2	1	33	32	9.5
II	4	2	17	16	8.5
III	6	3	11	10	7.5
IV	8	4	9	8	6.5
V	10	5	7	6	8.5
VI	12	6	5	4	16.5

2.6 회전자의 원심력 구조해석

일반적으로 회전자에 작용하는 원심력은 각속도 ω 로 회전하는 회전자의 회전중심에서 거리 r 에 있는 미소질량 Δm 에 반경방향으로 작용하며 원주방향으로 동일하게 분포된다. 이를 식으로 표현하면 다음과 같다.

$$F_{(r,\theta)} = \Delta m r \omega^2 \tag{6}$$

FEM 구조해석은 지배방정식으로부터 강성행렬과 변위행렬 그리고 힘의 행렬로 구성되며 다음식의 해를 구하는 것이다.

$$[F] = [K][D] \tag{7}$$

3. 결 과

3.1 SynRM 인덕턴스 결과

회전자의 자성체와 비자성체 적층폭에 따라 구분한 6 개 모델을 해석한 결과, 직축과 횡축의 인덕턴스와 비(L_d/L_q)를 표 3 과 같이 구하였다. 인덕턴스 비가 클수록 큰 토크를 얻어낼 수 있으므로 회전자 형상을 결정하는데 큰 변수로 작용한다.

특히 고속기에 적용하기 위해서는 높은 인덕턴스비와 함께 가능한 적층수를 줄여야 하므로, 표 3 에서 고속 회전자에 적합한 모델을 선택하면 모델 V 가 된다. 모델 V 는 모델 I 보다 층수를 5 배 정도로 줄여 고속기를 위한 구조적 안전성을 확보할 수 있으므로, 적층폭이 넓어짐으로 인한 철손 증가 및 인덕턴스비 감소 등의 문제점을 보완할 수 있다.

표 3 해석모델의 인덕턴스 결과

Table 3 Inductance results of analysis model

모델 구분	L_d [mH]	L_q [mH]	L_d/L_q
I	1.125	0.179	6.3
II	1.122	0.189	5.9
III	1.074	0.190	5.7
IV	1.112	0.191	5.8
V	1.086	0.183	5.9
VI	0.948	0.185	5.1

그림 7과 그림 8은 표 3의 결과를 얻기 위해 적용한 FEM 해석결과를 보여주는 것으로서 대표로 모델 V에 대한 직축 자력선도와 횡축 자력선도를 보여주며, 다른 모델도 이와 동일한 과정을 통해 직축과 횡축의 인덕턴스를 구해낼 수 있다.

한편, 그림 9에는 회전자 직축 방향(D-axis) 및 횡축 방향(Q-axis)으로 기자력을 인가한 경우의 공극자속밀도를 각각 나타내었다. D-axis는 회전자의 자성체 표면에서 높은 자속 밀도가 분포되고(약 0.75T) 비자성체 표면에서는 급감하는 것을 확인할 수 있으며, Q-axis의 경우엔 비자성체가 자속장벽 역할을 하여 전체 자속량이 직축보다 대폭 감소됨을 알 수 있다.

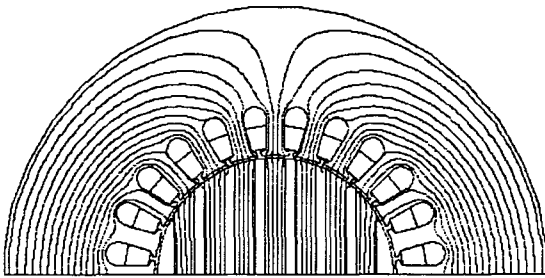


그림 7 회전자 직축과 평행한 자력선도 (회전자 회전각 = 0°)
Fig. 7 Flux line parallel to D-axis of rotor (rotated angle=0°)

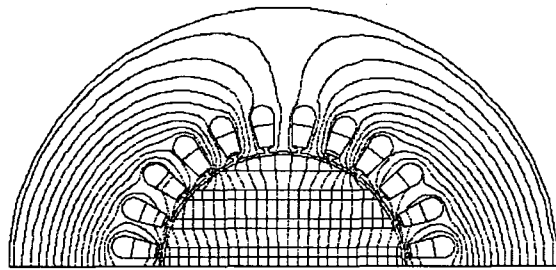


그림 8 회전자 횡축과 평행한 자력선도 (회전자 회전각 = 90°)
Fig. 8 Flux line parallel to Q-axis of rotor (rotated angle= ± 90°)

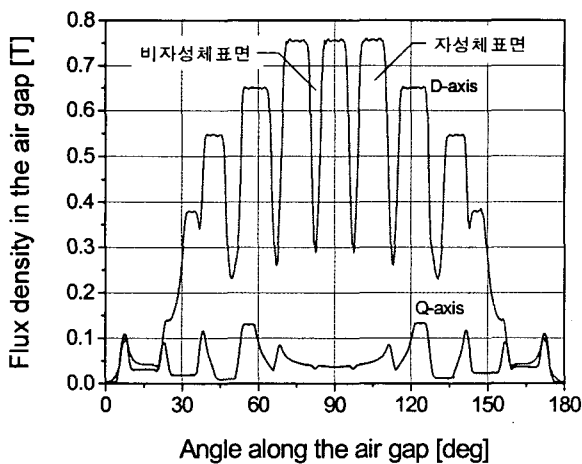


그림 9 모델 V에 대한 공극 자속밀도
Fig. 9 Flux density in the air gap (Model V)

그림 10은 모델 V에서 고정자 A 상 권선에 인가되는 전류 위상을 고정하여 회전자를 5° 간격으로 회전시킬 때, 회전각에 따른 인덕턴스 변화를 나타낸 것으로, 그래프에서 최고점은 직축 인덕턴스가 되며, 최저점은 횡축 인덕턴스에 해당된다. 특히, 인덕턴스의 변화는 이상적인 정현적 특성을 나타내어, 각 상별 인덕턴스와 직축, 횡축 인덕턴스 간의 기본파 형태의 변환관계(Park's Transform)가 성립되어, 직축과 횡축의 인덕턴스는 회전자 위치에 무관한 고정값으로 나타난다.

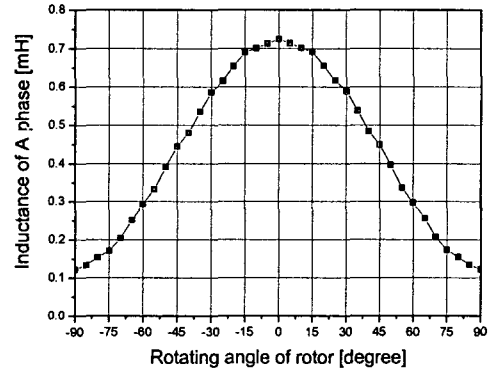


그림 10 회전자 위치에 따른 A 상 인덕턴스 변화
Fig. 10 Inductance variation according to rotor position

3.2 SynRM 토크특성

표 3의 인덕턴스 결과 값을 식 (4)에 대입하면, 그림 11과 같은 부하각 δ 에 따른 입력 전류값을 얻을 수 있으며, 식 (5)를 통하여 그림 12와 같이 부하각 δ 에 따른 토크를 구할 수 있다. 그림 11과 그림 12에서는 표 2에서 선정되었던 6개 모델에 대한 각각의 전류특성과 토크특성을 보여준다.

그림 11에서 부하각 δ 20° 이하영역에서는 Model VI를 제외하고는 각 모델의 전류 특성은 거의 유사하고, 그림 12에서의 토크 특성은 표 3의 인덕턴스 비와 비슷한 양상을 보여준다.

또한 고속 회전자로 적합하였던 모델 V는 모델 I 다음으로 높은 토크 특성을 가지며, 정격출력은 부하각이 약 11° 일 때에 31.3Nm의 정격토크가 발생하여 비교 대상의 유도전동기와 같은 출력을 가진다. 이때의 모델 V의 입력전류는 약 264 A이다.

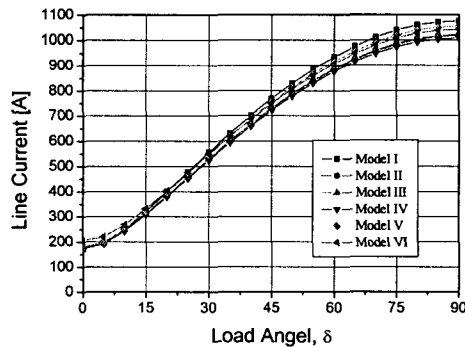


그림 11 부하각 δ 따른 입력전류특성
Fig. 11 Input current characteristics according to load angle δ

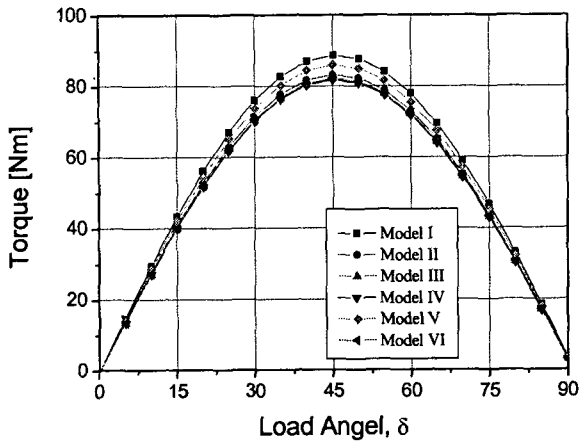


그림 12 부하각 δ 따른 토크

Fig. 12 Torque characteristics according to load angle δ

표 4는 각 모델별 부하각 $\delta = 11^\circ$ 일 때의 토크값 및 적층 수를 비교한 것으로, 최대토크 기준으로 모델 1과 V가 두드러지며, 적은 적층수에 따른 제작의 용이성 및 안정성 확보를 감안할 때, 모델 V가 활용도가 높을 것으로 평가된다.

표 4 부하각 $\delta = 11^\circ$ 일 때, 모델별 특성 비교

Table 4 Comparison of model characteristics at $\delta = 11^\circ$

모델 구분	회전자 적층수		토크 ($\delta = 11^\circ$)
	자성체	비자성체	
I	33	32	32.3 Nm
II	17	16	30.3 Nm
III	11	10	29.9 Nm
IV	9	8	29.8 Nm
V	7	6	31.3 Nm
VI	5	4	29.9 Nm

표 5는 SynRM(모델 V)과 유도전동기의 특성비교를 한 것이다. 특히, SynRM의 효율과 역률은 유도전동기에 비해 떨어지는데, 이는 유도전동기와의 직접 비교를 위해 동일 고정자를 적용하였기 때문이다. 따라서 인덕턴스 비를 개선하면서 동등 이상의 효율과 역률을 위해서는, 고정자 치수 및 형상설계가 본 논문의 회전자 설계(적층폭, 적층수)와 병행해서 이루어져야 할 것으로 사료된다.

표 5 SynRM과 유도전동기 정격특성비교

Table 5 Characteristics comparison of SynRM and induction motor at the rated point.

	SynRM	유도전동기
정격전압	350 V	350 V
정격전류	264 A	204 A
정격토크	31.3 Nm	32 Nm
정격속도	30,000 rpm	30,000 rpm
역률	0.712	0.85
효율	86.3 %	95.6 %

3.3 SynRM 원심력 구조해석 결과

SynRM의 구조해석은 자성체와 비자성체가 이론적으로 견고하게 붙어있다는 가정하에 수행하였으며, 그림 13은 30,000 rpm으로 회전하고 있는 SynRM 회전자에 대한 원심력 해석 결과이다. 이것은 회전자내의 응력을 나타낸 것으로서, 회전자 회전할 때 발생하는 최대 응력은 중심에서 그 값이 가장 높고 바깥으로 갈수록 줄어드는 것을 볼 수 있다.

회전자중심에서부터 x축을 따라 응력추이를 보면 그림 14와 같다. 중심에서 최대 응력 110 MPa이 발생하며, 이 값은 자성체 S20C의 항복강도 350 MPa, 비자성체 SUS304의 항복강도 215 MPa 보다 낮은 값이기 때문에 일반적인 설계안전을 1.7을 감안하더라도 재료의 강도는 충분하다는 것을 알 수 있다. 또한 최대변위는 회전자의 외경에서 발생하며 이 값은 14 μm 에 미치지 않는다. 이 값은 공극의 변화나 회전자의 자기적 특성에 영향을 줄 수 없을 만큼의 아주 미미한 값을 알 수 있다.

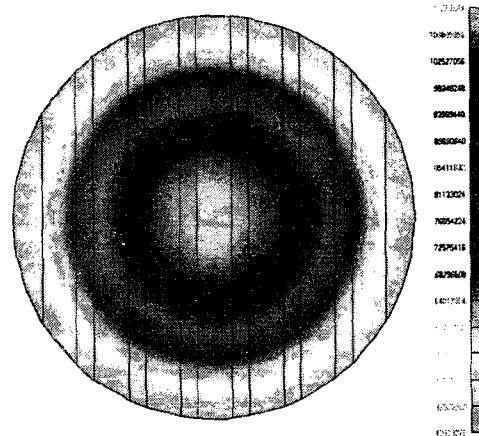


그림 13 SynRM 회전자내 응력 분포도 (30,000 rpm)

Fig. 13 Stress distribution in the rotor (SynRM)

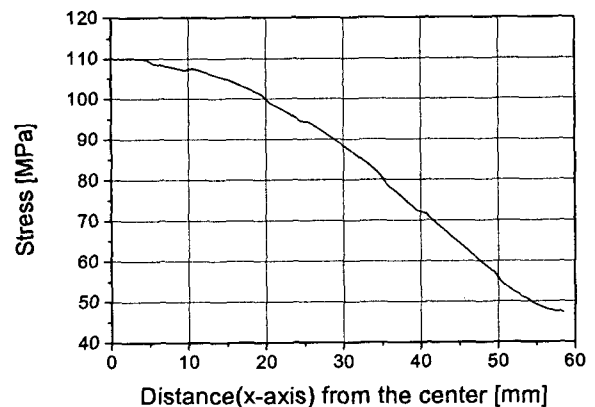


그림 14 중심에서 x축을 따라 분포하는 원심력 (30,000 rpm)

Fig. 14 Distribution of centrifugal force along to x axis from center

4. 결 론

본 논문에서는 고속 전동기에 ALA 회전자(Axially Laminated Rotor)를 가진 SynRM 을 적용하기 위해 적합한 회전자 형상 및 치수를 제시하고 SynRM 특성을 유도전동기와 비교하였다. 비교 결과에 따르면 유도전동기에 비해 역률이 낮고 입력전류가 높지만, 이는 유도전동기와 같은 고정자를 사용하였기 때문이며, SynRM 특성에 적합한 설계기법을 적용할 경우 많은 개선이 있을 것으로 기대하며, 특히 회전자에서 비자성체와 자성체의 최적의 폭은 고정자의 크기에 따라 달라지므로 반드시 많은 시뮬레이션 과정을 통해 결정하여야 할 것이다.

고속기에 SynRM 적용하기 위해서는 구조적으로 안전하고, 제작이 용이하여야 하므로 가능한 적층폭을 넓게 하는 것이 바람직하다. 회전자 설계시에는 원심력결과에서 언급하였던 것과 같이 재질적인 면에서는 기계적 강도가 충분하다고 하더라도 적층면 용접해야 하는 ALA 회전자형은 용접정도에 따라 강도가 크게 달라지기 때문에 용접방법 결정과 실험을 통한 용접정도를 면밀히 검증할 필요가 있다.

기 호

[D]	- 절점변위행렬	r	- 회전자 반경 [m]
[F]	- 탄성력(=원심력)	V	- 선간전압
[K]	- 강성행렬	\mathbf{v}_{abc}	- $[v_a v_b v_c]^T$
\mathbf{i}_{abc}	- $[i_a i_b i_c]^T$	\mathbf{v}_{qd0}	- $[v_q v_d v_0]^T$
I_d	- 직축전류	V_d	- 직축전압
I_q	- 횡축전류	V_q	- 횡축전압
m	- 회전자 무게 [kg]	ω	- 각속도 [rad/s]
P	- 극수	λ_d	- 직축 총자속
r_s	- $r_s I$	λ_q	- 횡축 총자속

감사의 글

본 연구는 2001학년도 동아대학교 교내학술연구비(공모과제) 지원에 의하여 수행된 과제임.

참 고 문 헌

[1] A. J. O. Cruickshank, R. W. Menzies, A. F. Anderson, "Axially laminated anisotropic rotors for reluctance motors", Proc., IEE, Vol. 113, December 1966, pp. 2058-2060.

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

[3] I. Boldea, Z. X. Fu and S. A. Nasar, "Performance Evaluation of Axially-Laminated Anisotropic(ALA) Rotor Reluctance Synchronous Motors", Record of IEEE-IAS 1992, Part 1, pp. 212-218.

[4] I. MARONGIU, A. VAGATI, "IMPROVED MODELLING

OF A DISTRIBUTED ANISOTROPY SYNCHRONOUS RELUCTANCE MACHINE", Industry Applications Society Annual Meeting, 1991., Conference Record of the 1991 IEEE, 28 Sept.-4 Oct. 1991 vol.1, pp. 238 - 243.

[5] Katsumi Uezato, Tomonobu Senjyu and Yoshikatsu Tomori, "Parameter Measurement of Synchronous Reluctance Motors Including Stator and Rotor Iron Loss", 1993(SMIC'93) Small motor International Conference, pp. 247-252.

저 자 소 개



홍 정 표 (洪 定 杓)

1975년 1월 6일생. 1997년 동아대 전기공학과 졸업. 1999년 동 대학원 전기공학과 졸업(석사), 2001년~현재 동 대학원 전기공학과(박사과정). 현재 한국전기연구원 산업전기연구단 Mechatronics연구그룹 위촉연구원
Tel : 055-280-1484, Fax : 055-280-1547
E-mail : hjp5000@keri.re.kr



주 수 원 (周 秀 元)

1943년 1월 19일생. 1968년 한양대 공대 전기공학과 졸업. 1970년 동 대학원 졸업(석사). 1981년 동 대학원 전기공학과 수료(박사). 1973년~현재 동아대 공대 전기공학과 교수.
Tel : 051-200-7735, Fax : 051-200-6947
e-mail : swjoo@dau.ac.kr



한 성 진 (韓 聲 鎭)

1955년 6월 27일생. 1979년 서울대 공대 전기공학과 졸업. 1981년 동 대학원 전기공학과 졸업(석사). 1992년 동 대학원 전기공학과 졸업(박사). 1983년 3월~현재 동아대 전기공학과 교수.

Tel : 051-200-7737, Fax : 051-200-6947
E-mail : schahn@dau.ac.kr



구 대 현 (具 大 鉉)

1963년 9월 21일 생. 1989년 한양대학교 공과대학 전기공학과 졸업. 1991년 동 대학원 전기공학과 졸업(석사).

2002년 동아대학교 전기공학과 졸업(박사) 1991년~현재 한국전기연구원 산업전기연구단 Mechatronics 연구그룹 그룹장(책임연구원)
Tel : 055-280-1486, Fax : 055-280-1547
E-mail : dhk371@keri.re.kr