

슈퍼프리미엄(IE4)급 유도전동기 대체용 동기 릴럭턴스 전동기 고효율 설계연구

(High Efficiency Design of Ie4 Class Synrm Substituting for Induction Motor)

유광현* · 이 주**

(Gwang-Hyeon Ryu · Ju Lee)

Abstract

In accordance with global energy conservation policies such as MEPS (Minimum Energy Performance Standard), electric motor industry is moving to super-high-efficiency machines and research to develop IE4 (International Energy Efficiency Class 4) motors has been launched. In this situation, SynRM (Synchronous Reluctance Motor) has been attracting attention in place of induction motor which hardly provides super premium efficiency. As a result, much research on SynRM is being performed at home and abroad. Also, some products have already been appearing in the market. Compared to induction motor, SynRM has better efficiency per unit area and wider operating range. Although the utilization of control system in synchronous motor results in higher prices, we still need to concentrate on developments of SynRM so as to comply with the new policies. This study demonstrated the electromagnetic design methods of super premium SynRM while maintaining the frame of existing IE3 induction motor. We documented the design procedures for generating high saliency which is the most essential and mechanical stress analysis is also treated. In conclusion, we proved the validity of our design by manufacturing and testing our 3 models.

Key Words : SynRM, MEPS, IE4, Parameter Design

1. 서 론

전동기의 최저효율제(MEPS)가 시행되면서 현재 고효율(IE2) 유도 전동기가 생산 및 판매되고 있으며 2016년 10월부터는 프리미엄급 유도전동기를 대기업의 경우 의무적으로 생산하고 판매해야 한다. 향후 몇 년 안으로 프리미엄급(IE3) 유도기가 주를 이룰 것이며 2020년경에는 슈퍼프리미엄급(IE4)의 전동기가

* Main author : Doctor's course Electrical Engineering, Hanyang University
** Corresponding author : Professor Electrical Engineering, Hanyang University
Tel : 02-2220-4349, Fax : 02-2295-7111
E-mail : ghryu@hanyang.ac.kr
Received : 2015. 3. 19
Accepted : 2015. 10. 26

의무화될 예정이다. 이러한 흐름에서 기존 유도기의 프레임 사이즈를 만족하며 슈퍼프리미엄급을 설계하기는 제작 및 재료 설계기술의 한계가 있다. 슈퍼프리미엄급을 대체할 전동기의 해외 사례를 보면 스위스 A社에서 슈퍼프리미엄(IE4)급 SynRM과 영구자석을 삽입한 울트라 슈퍼프리미엄(IE5)급 PMA-SynRM을 판매하고 있다. 이러한 상황에서 국내에서도 슈퍼프리미엄급 SynRM 설계 및 개발에 대한 이슈가 본격화 되고 있다.

SynRM은 동기 릴럭턴스 전동기로서 구동을 위한 가변전압가변주파수(VVVF)의 벡터 인버터가 필수 적이나 가변속 범위가 넓고 응용분야가 넓기 때문에 부하의 빈번한 속도 변동이나 크기변동 대응 측면 등 여러 가지 측면에서 산업 동력용으로 적합하다. 또한 SynRM은 구조적으로 회전자에 추가적인 다이캐스팅 작업이 불필요하고 금형으로 프레스 가공하여 적층을 하기 때문에 장기적으로 양산 단가를 낮출 수 있는 장점도 있다. 이러한 다양한 장점을 갖는 SynRM은 돌극차에 의한 릴럭턴스 토크를 이용하기 때문에 회전자의 형상설계가 매우 중요하다. 회전자의 돌극차를 가장 크게 할 수 있는 방법은 과거 루마니아의 Ion boldea 교수가 제안한 축방향 성층형 회전자구조이다. 이러한 회전자 구조는 릴럭턴스 토크를 극대화 할 수 있으나 제작의 현실성이 떨어지고 기계적인 강성이 취약하여 현재 널리 상용화 되지는 못하였다. 일반적으로 돌극차 혹은 돌극비를 크게 하기 위해서는 멀티 자속장벽을 이용하여 설계하는 것이 기본이나 실제 멀티 자속장벽을 하게 되면 기계적인 강성에 취약해 지므로 기계적인 강성도 함께 고려하여 설계해야 한다 [1-3].

본 논문에서는 실제 3가지 용량의 일반 프리미엄 유도기 사이즈를 조건으로 슈퍼프리미엄급 SynRM의 설계 전반에 대해 다룬다. 회전자 자속장벽을 설정하고 돌극차와 돌극비를 극대화 할 수 있는 방안, 그리고 기계적인 강성을 만족시키는 모델을 제안하였다. 최종적으로 제작 및 시험결과를 제시한다.

2. 요구사항 및 설계이론

2.1 요구사항

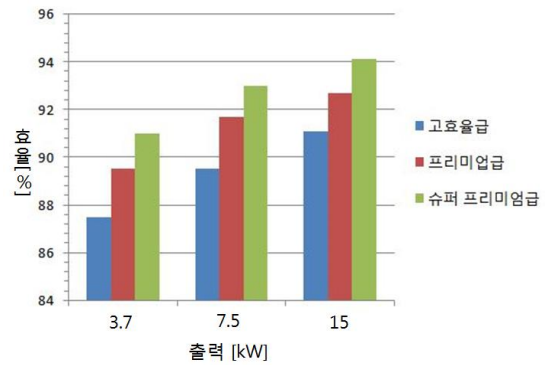


Fig. 1. Class efficiency for induction motor according to each output power

그림 1은 유도전동기의 각 출력에 따른 등급별 효율의 그래프를 나타내고 있다. SynRM이 유도기를 대체하기 위해서는 위의 그림에서와 같이 슈퍼프리미엄급 효율보다 높아야 한다. 본 논문은 3.7kW, 7.5kW, 15kW급 모터를 최적 설계하여 요구사항에 만족하는 전동기를 제안하였다.

Table 1. Specification

항목	단위	사양		
전동기 타입		SynRM		
극수		4		
전압	Vrms	460		
출력	kW	3.7	7.5	15
정격전류	Arms	7.2	14.3	28.6
상수(Phase)		3		
정격주파수	Hz	60		
정격속도	rpm	1800		
토크	Nm	20	40	80
정격효율	%	92.5 ↑	94 ↑	95.5 ↑
역률		0.7 ↑		
주변온도	℃	20		

표 1은 요구받은 각 출력에 따른 스펙을 정리해 놓은 표이다. 표에서 보이는바와 같이 정격효율과 역률의 목표치를 달성시킴으로써 유도기 대체 가능한 슈퍼 프리미엄급 SynRM을 설계한다.

2.2 설계이론

SynRM(Synchronous Reluctance Motor)은 영구자석 기기와는 달리 릴럭턴스 토크로만 회전하는 전동기이다. 따라서 영구자석을 사용하지 않기 때문에 회전자 자속장벽 형상에 따라 토크와 역률 특성이 크게 달라진다.

$$T = \frac{3}{2} \frac{P}{2} (L_d - L_q) i_{ds} i_{qs} \tag{2.1}$$

$$\cos\phi = \frac{\left(\frac{L_d}{L_q} - 1\right)}{\sqrt{\left(\frac{L_d}{L_q}\right)^2 \frac{1}{\sin^2\theta} + \frac{1}{\cos^2\theta}}} \tag{2.2}$$

이때 $L_d - L_q$: 돌극차
 $\frac{L_d}{L_q}$: 돌극비

위의 식은 SynRM의 토크와 역률식이다. 식에서와 같이 돌극차와 돌극비를 증가시키면 토크와 역률이 향상 되는 것을 확인할 수 있다. 하지만 돌극비만을 위한 회전자 형상설계가 진행된다면 회전자의 강성 혹은 풍손 등의 문제로 성능을 저하시킬 수 있으므로 이 점을 잘 고려하여 설계해야 한다.

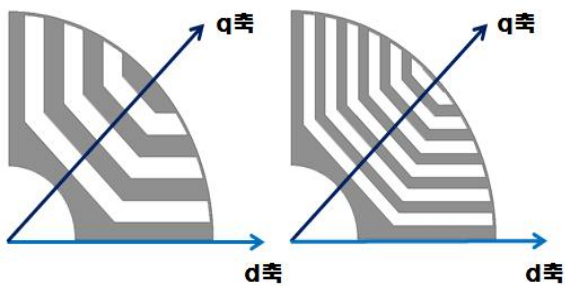
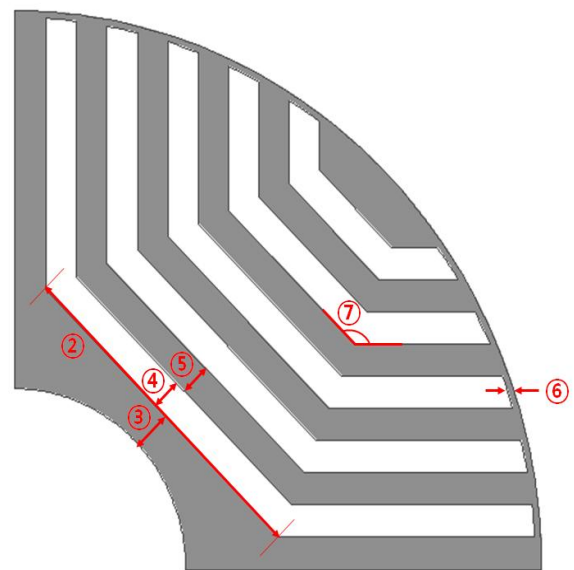


Fig. 2. Rotor shape according to barrier number

그림 2는 자속장벽 형상에 따라 d축과 q축 인덕턴스 비가 어떻게 변하는 가를 보여주고 있다. 자속장벽의 형상설계 시 자속장벽의 수가 너무 적으면 L_q 가 증가 하고 자속장벽이 많아지면 세그먼트가 얇아져 포화의 우려와 기계적인 강성의 제한이 있다. 따라서 적당한 자속장벽의 형상을 고려하여 형상 설계를 해야 한다.

3. 기초설계방안



설계변수	① 자속 장벽(barrier)수	⑤ 철심 두께(세그먼트)
	② 자속 장벽 밀변 길이	⑥ Rib 두께
	③ 중심 거리	⑦ 자속 장벽 각도
	④ 자속 장벽 두께	

Fig. 3. Rotor design variable

주어진 요구 스펙을 토대로 모터의 크기를 결정하고 고정자와 회전자의 직경, 슬롯 수와 슬롯 면적, 그리고 회전자의 형상을 결정한다. 회전자의 형상설계 시 각각의 변수를 설정하여 유한요소법으로 해석한다. 각 변수는 자속장벽(barrier)의 수, kw비(자속장벽과 세그먼트와의 비), 각 자속장벽의 밀변 길이, 자속장벽의 각, 림(rib) 두께 브릿지(bridge)두께를 각 변수로 설정하였다[4-5].

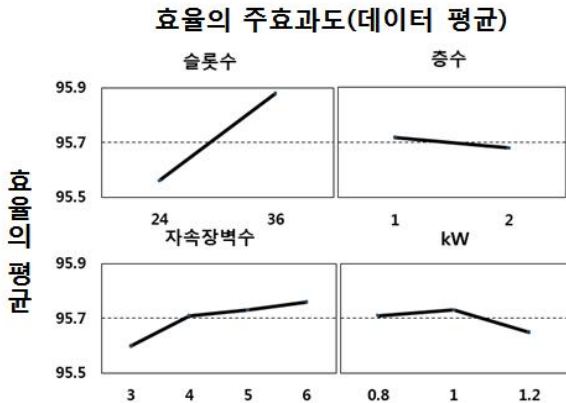


Fig. 4. Analysis using Design Of Experiments

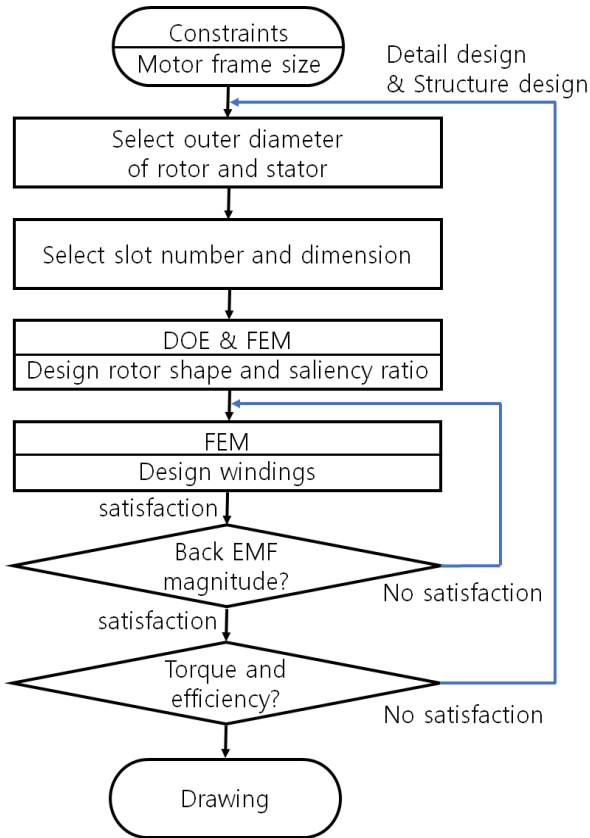


Fig. 5. SynRM rotor design algorithm using FEA

그림 4는 요인 설계법을 이용한 분석이다. 그림에서 보는 바와 같이 슬롯의 경우 24슬롯 보다는 36슬롯에서 층수는 2층권 보다는 1층권으로 했을 때 평균효율이 올라가는 것을 확인할수 있다. 마찬가지로 kw비도 1일 때가 가장 이상적이었다. 자속장벽은

개수가 6일 때가 가장 성능이 좋다. 하지만 자속장벽의 개수가 올라갈수록 자속장벽과 세그먼트가 얇아져서 양산시 금형의 가격 및 수명에 문제가 있을 수 있고 고속 회전시 기계적인 강성에 문제가 있을 수 있기 때문에 본 논문에서는 자속장벽수를 5개로 선정하였다.

그림 5와 같이 회전자 설계를 바탕으로 기존스펙을 만족하도록 고정자 권선을 설계한다. 턴 수에 따른 쇄교 자속에 의한 역기전력을 2D 유한요소법을 통하여 계산하고, 이를 이용하여 정격 전압 레벨에 해당하는 권선 설계를 얻을 수 있다. 만약 권선 설계만으로 목표 전류 밀도를 만족할 수 없다면 초기 결정한 슬롯의 면적을 조정한다. 마지막으로 목표 효율 또는 토크를 만족하지 못한다면 회전자와 고정자의 길이를 바꾸고 권선을 다시 설계한다.

4. 상세설계결과 및 강성 해석

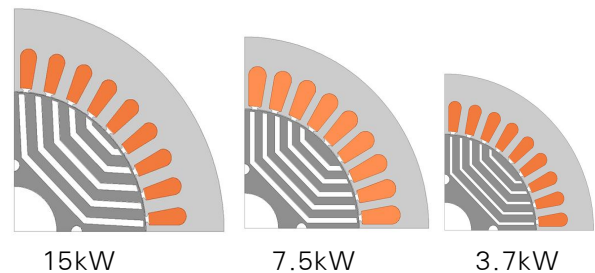


Fig. 6. Designed rotor for each output power

그림 4는 각 출력(3.7, 7.5, 15kW)별로 설계된 SynRM 설계도면이다. 그림 3의 알고리즘으로 각각의 파라미터를 설정하여 그림과 설계하였다. 각 모델별로 설계한 모터의 상세한 스펙은 아래 표와 같다.

이와 같이 주어진 요구 스펙에서 회전자를 전자장 해석을 통해 상세모델 설계를 진행하였다. 하지만 SynRM에는 자속장벽이 이루고 있는 부분이 많기 때문에 고속 회전시 립 부분의 강성이 약해져서 비산될 위험이 있다. 따라서 전자장 최적설계 이후에 강성 해석을 하는 단계가 이루어져야 한다.

Table 2. Winding

Winding	15kW	7.5kW	3.7kW	Unit
상전류	19	12.5	6.3	Arms
전류밀도	3.73	3.54	5	Arms/mm ²
병렬회로수	2			
상당직렬턴수	93	132	222	turn
슬롯당 도체수	31	44	74	
권선직경	1.8 (1.914)	1.5 (1.612)	0.9 (0.986)	mm
소선수	1			
상저항	0.26	0.449	1.664	Ω
점적률	63.3	61.8	65.4	%

Table 3.

Modeling	15kW	7.5kW	3.7kW	Unit
극수	4			
고정자 슬롯수	36			
고정자 외경	267	223.5	190.5	mm
적층	200	160	110	mm
전기강판 재질	50PN400 (S14)	50PN470(S18)		

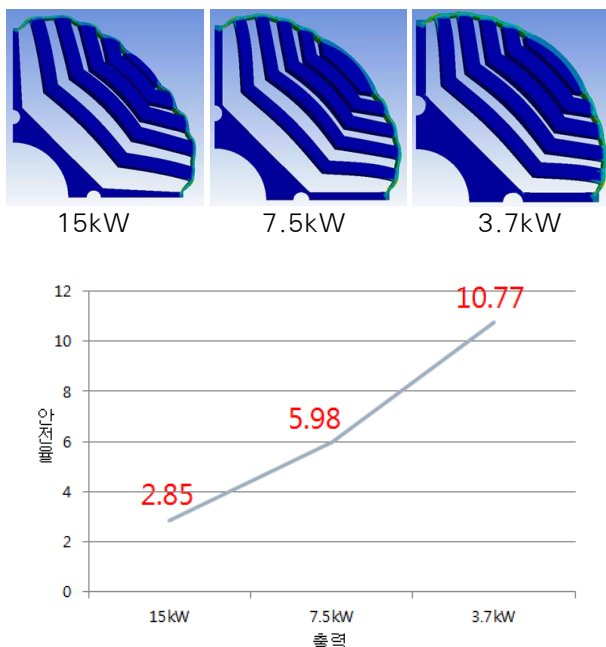


Fig. 7. Stiffness analysis for each output power

그림 7은 강성 해석 결과이다. 15kW, 7.5kW, 3.7kW에서의 안전율이 모두 1.5 이상인 것을 확인할 수 있다.

따라서 안전율이 모두 기준보다 높기 때문에 비산되지 않을 것으로 판단했다.

5. 실험결과 비교

표 4는 설계된 15kW, 7.5kW, 3.7kW의 전동기 해석 값이다. 해석상으로 효율과 역률은 모두 목표치 보다 높게 나왔음을 확인할 수 있다. 따라서 실제 전동기를 제작하여 실험을 진행하였다.

표 5는 각 사이즈별 전동기의 실험 결과이다. 15kW SynRM은 실험치 데이터가 96.37%가 나왔으므로 해석상으로 알아낸 효율보다도 높게 나왔다. 7.5kW와 3.7kW는 94.64%와 92.91%로 해석한 데이터보다는 낮게 나왔으나 목표효율 보다는 높게 나왔다는 것을 확인할 수 있었다. 목표효율이 높게 나온 것은 기계손 부분에 대한 오프셋 값이 기존 유도전동기 데이터를 참조하였는데 샘플 제작시 제작성이 좋아 양산시 보다 오차율이 줄어 든 것으로 판단된다.

Table 4. FEA analysis result

설계결과	unit	15kW	7.5kW	3.7kW
상전류	Arms	19	12.5	6.3
전류 위상각	deg	60	60	64
유기전압	Vrms	368.1	294.0	312.3
토크 (목표토크)	Nm	85.75 (80.0)	42.44 (40.0)	22.94 (20.0)
토크리플	%	10.59	9.04	6.31
THD	%	3.79	5.53	5.54
동손	W	281.6	210.5	198.1
철손	W	296.0	156.9	54.3
기계손	W	90.0	30.1	27.6
효율 (목표효율)	%	95.94 (95.5)	95.16 (94.0)	93.81 (92.5)
역률 (목표역률)		0.79 (0.7)	0.75 (0.7)	0.75 (0.7)

Table 5. Experiment result

실험결과	unit	15kW	7.5kW	3.7kW
전류	Arms	19.95	13.44	6.32
전류 위상각	deg	61	58	59
전압	Vrms	338.24	274.52	313.04
입력 전력	kW	15.67	8.04	4.1
토크	Nm	80.09	40.37	20.21
출력	kW	15.10	7.61	3.81
효율	%	96.37	94.64	92.91
역률		0.78	0.73	0.7
포화 전/후 전동기온도	℃	21/73.17	21/72.76	21/71.96



Fig. 8. Experiment environment

6. 결 론

본 논문은 유도기를 대체하기 위한 각 사이즈 별 동기형 릴럭턴스 전동기의 전반적인 설계법을 제안하였다. 토크와 역률을 위해 해석을 통해 돌극비가 가장 적절한 점을 찾아서 회전자 형상을 결정하였으며, 유한요소법을 이용하여 계산된 역기전력으로 권선 턴수를 결정하고 슬롯의 점적률을 제한하여 코일 직경을 결정하였다.

각 사이즈별로 전동기 모델을 제작하고 시험을 통하

여 목표 효율을 달성함으로써 제작된 동기 릴럭턴스 전동기가 유도전동기를 대체할 수 있는 슈퍼프리미엄급의 효율 이상을 달성하였다.

하지만 앞으로 회전자 강성 안전율의 여유가 있고 차등 자속장벽 적용 등 그리고 양산을 위한 회전자 금형문제등 추가적인 설계 방안이 남아 있다. 따라서 추후에는 위와 같은 사항 등을 고려하여 슈퍼 프리미엄급 SynRM을 재설계할 예정이다.

References

- [1] ABB, IE4 synchronous reluctance motor and drive package Optimized cost of ownership for pump and fan applications (2012).
- [2] Huai-cong Liu, Ho-Jun Lee, Se-Young Oh, Gwang-Hyeon Ryu, Hyun-Seok Hong, Seung-Joo Kim, Ju Lee "Decrease torque ripple for super premium SynRM using barrier arrangement design" Electrical Machinery & Energy Conversion Systems Society Annual Spring Conference 2013.
- [3] I.Boldae "Reluctance Synchronous Machines and drives" pp. 46-47.
- [4] Masayuki Sanada "Torque Ripple Improvement for Synchronous Reluctance Motor Using an Asymmetric Flux Barrier Arrangement", IEEE TRANSACTIONS ON INDUSTRY APPLICATIONS, VOL. 40, NO. 4, JULY/AUGUST, pp. 1076-1082 2004.
- [5] Kim, Won Ho "A Study on the Optima: Design Method of Synchronous Reluctance Motor for the High Torque and Power Factor " Dept. of Electrical Engineering The Graduate School Hanyang University Master's Thesis.

◇ 저자소개 ◇



유광현 (柳光鉉)

1982년 12월 18일생. 2009년 한양대 전기 제어생체공학부 졸업. 2015년~현재 동 대학원 석·박 통합과정.



이 주 (李柱)

1963년 8월 30일생. 1986년 한양대 전기 공학과 졸업. 1988년 동 대학원 전기공학과 졸업(석사). 1998~1993년 국방과학연구소 연구원. 1997년 일본 큐슈대학교 System 정보과학연구과 졸업(박사). 1997년 한국철도 기술연구원 선임연구원. 1997년~현재 한양대 전기생체공학부 교수.