

유도전동기 대체 라인기동식 동기형 릴럭턴스 전동기 회전자의 설계 연구

Study on the Design of Line-Start Synchronous Reluctance Motor Replacing Induction Motor

유 회 총* · 이 상 돈** · 이 주†
(Huai-Cong Liu · Sang-Don Lee · Ju Lee)

Abstract - In this paper, LS-SynRM (Line Start-Synchronous Reluctance Motor) has been attracting attention in replace of induction motor which hardly provides high efficiency. Compared to induction motor, LS-SynRM has better efficiency per unit area. This study demonstrated the electromagnetic design methods of LS-SynRM while maintaining the frame of existing IE3 induction motor for blower. 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 LS-SynRM models.

Key Words : MEPS, LS-SynRM, Induction motor, Parameter design

1. 서 론

현재 전동기는 전체 전력 소비량의 60% 이상을 차지하고 있으며, 유도전동기의 경우 전체 전동기의 전력 소비량의 70% 이상을 차지하고 있다[1]. 미국을 비롯한 선진각국에서는 90년대 들어 에너지 절감을 위해 고효율 전동기의 생산 판매를 의무화하는 최저효율제 (Minimum Energy Performance Standards) 정책을 법률로 제정하여 시행해 오고 있으며, 2016년 10월부터는 프리미엄급(IE3) 유도전동기를 대기업의 경우, 의무적으로 생산하고 판매해야 한다. 향후 몇 년 안으로 프리미엄급 유도전동기가 주를 이룰 것이며 2022년경에는 슈퍼프리미엄급(IE4)의 전동기가 의무화될 예정이다[2] [3].

산업용 분야에서 동력원으로 널리 사용되는 유도전동기는 개발된 지 100년 이상의 역사를 가지고 있으며 그동안 설계, 재료, 가공, 전력변환, 기술 등의 전동기 관련 요소 기술이 향상되었으므로, 전동기의 성능 향상, 경량화, 가격저감 등이 더 높게 실현되고 있다.

동기형 릴럭턴스 전동기(Synchronous Reluctance Motor,

SynRM)는 구조적으로 회전자에 추가적인 다이캐스팅 작업이 불필요하고 금형으로 프레스 가공하여 적층을 하기 때문에 장기적으로 양산단가를 낮출 수 있는 장점이 있다. 또한 유도전동기의 발생 손실은 1차측 동손, 철손, 2차측 동손, 기계손, 표류부하손실로 나눌 수 있으며, 유도전동기와는 달리 SynRM은 회전자에 권선과 농형 알루미늄 도체 바가 없어 2차측 동손이 발생하지 않는다. 기존 유도전동기 비해 베어링 온도상승 폭이 낮아 베어링 수명도 연장시킬 수 있다. 하지만 SynRM 는 제어용 동기전동기로서 기동시 및 가변속제어시 인버터가 필요하다. 따라서 정속, 정토크 부하의 어플리케이션을 적용하면 전동기 및 인버터를 포함한 동력원은 단가상승의 단점이 있다.

라인 기동식 동기형 릴럭턴스 전동기(Line-Start Synchronous Reluctance Motor)는 그림 1과 같이 회전자에 댐핑바를 설치하여 유도전동기의 원리에 의해 기동토크를 발생시켜 가속하여 동기속도로 운전하는 방식이다. 댐핑바에는 동기속도 이상으로 되면 회전방향과 반대방향으로 힘을 발생시키고 동기속도이하에서는 회전방향으로 힘이 발생 되므로 동기전동기를 안정되게 운전하도록 도와준다[4].

LS-SynRM의 설계 시에는 댐핑바의 슬롯형상을 고려하여 설계해야 한다. 슬롯형상에 따른 2차측저항은 초기기동 특성에 대한 크게 영향을 미친다. 또한 SynRM 회전자의 설계 방식과 마찬가지로 정상상태 돌극(Salient Pole)차 혹은 돌극비를 크게 하기 위해서는 멀티 자속장벽을 이용하여 설계하는 것이 기본이나 실제 멀티 자속장벽을 하게 되면 기계적인 강성이 취약해 지므로 이를 함께 고려하여 설계해야 한다[5].

본 논문에서는 블로워용 3.7kW IE3급 유도전동기의 전자기장

† Corresponding Author: Dept of Electrical Engineering, Hanyang University, Korea.

E-mail: Julee@hanyang.ac.kr

* Author: Dept of Electrical Engineering, Hanyang University, Korea.

** Author: Dept of Electrical Engineering, Gangneung-Wonju National University, Korea.

Received : August 6, 2016; Accepted : October 28, 2016

을 특성을 분석한 후, 유도전동기의 고정자 프레임 사이즈를 고정시키는 조건으로 슈퍼 프리미엄급 LS-SynRM의 회전자 설계 전반에 대해 다룬다. 댐핑바의 현상설계, 회전자 자속장벽을 설정하고 돌극비를 극대화 할 수 있는 방안, 댐핑바 슬롯 및 자속장벽의 정립, 그리고 기계적으로 강성을 만족시키는 모델을 제안하였다. 또한 유도전동기와 출력, 손실 및 효율특성 비교, 분석한 후 제작 및 시험 결과를 제시하였다.

2. 본 론

2009년 유럽 연합(EU) 집행위원회는 전동기를 출력과 효율에 따라 여러 등급으로 분류하는 EN 60034-30:2009 지침을 시행하였다. 등급은 표준 효율에 해당하는 IE1부터 슈퍼 프리미엄급인 IE4까지로 분류되는데 효율 등급이 한 단계 오를 때마다 손실은 20%가 감소한다. 이 지침은 2015년부터 유럽연합에서 생산되는 모든 전동기는 최소 IE3의 효율 등급을 가질 것이라고 명시하고 있다. 그림 1에 4극, 60Hz 유도전동기에 대한 용량별 분류가 나와 있다.

국내에서는 최저효율제와 같은 강제 의무정책시행을 2011년부터 시작하고 기준을 4단계로 제정했다. (IE1: 표준효율 전동기, IE2: 고효율 전동기, IE3: 프리미엄급 고효율 전동기, IE4: 슈퍼 프리미엄급 고효율 전동기)

표 1 유도전동기 해석모델 사양

Table 1 Design parameters for Induction motor

		수치	단위
설계 포인트	토크	20	[Nm]
	속도	1775	[rpm]
설계 제한치	선간전압	380	[Vrms]
	전류	8.49	[Arms]
회전자	회전자 도체수	28	
고정자	극수/슬롯수	4/36	
	치 당 턴수	57	

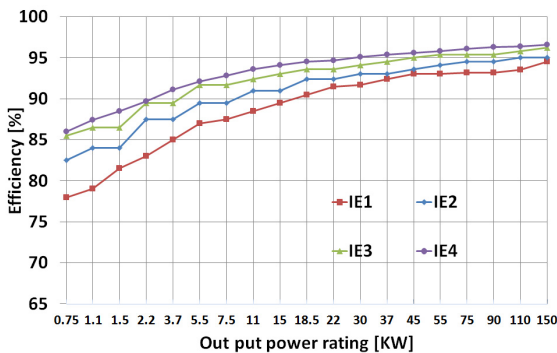


그림 1 IEC 60034-30 4극60Hz 전동기 효율 기준

Fig. 1 IEC 60034-30 efficiency standard for a 4-pole, 60 Hz motor.

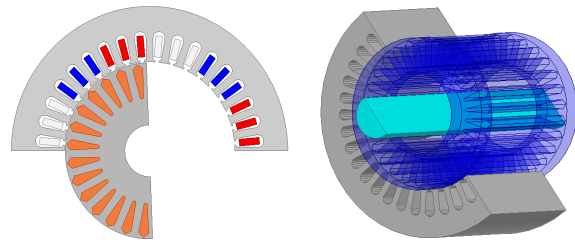


그림 2 IE3급 유도전동기 해석 모델

Fig. 2 IE3 Induction motor analysis model

본 논문에서 다룬 IE3급 유도전동기 해석 모델 사양을 표 1에 나타내었다. 유도전동기의 해석 모델은 그림 2와 같이 선정하였다.

2.1 유도전동기 특성 분석

블로워용 유도전동기는 팬이나 브라켓과 같은 부하와 연결하여 공기를 흐르게 하는 기계적 에너지를 발생시킨다. 블로워 전동기 부하 특성 곡선은 공기 유동속도가 커질수록 요구토크가 증가하는 경향을 보인다. 하지만 일반적인 경우 공기기압이나 공기 질량이 일정하면 요구토크도 거의 일정하며, 요구동력은 블로워용 유도전동기의 회전속도에 비례한다. 전동기의 기계적 출력은 식 (1)과 같이 표현할 수 있다.

$$P_{Load} = wT_L = \frac{2\pi N}{60} \cdot T_L \quad (1)$$

여기에서 T_L 는 블로워의 부하토크[Nm]; N은 블로워 팬의 분당회전수[RPM]로 표시했다. 축 동력은 전동기의 축이 직결되어 있는 경우 블로워의 기계적 출력과 같다고 본다. 제시한 블로워용 IE3급 유도전동기는 3상 선간 전압 380V의 일정한 크기와 주파수를 갖는 전원이 공급되고 정격부하의 크기 또한 일정한 부하로 결정되므로 본 논문에서는 정격 포인트의 특성을 분석했다.

전동기해석에 있어서 신뢰성을 갖는 철손성분을 구하기 위해 규소강판의 비선형 특성을 고려하여 유한요소해석을 수행하였다. 특히 회전자에서 국부적으로 왜곡된 자속파형은 기본파와 고조파 성분들로 나눌 수 있으며, 그때 전체 철손은 식 (2)으로 나타낸다.

$$W_i = \int_{iron} \sum_n K_e D \cdot (nf)^2 \cdot B_{r,n}^2 + B_{\theta,n}^2 dv + \int_{iron} \sum_n K_h D \cdot (nf)^2 \cdot B_{r,n}^2 + B_{\theta,n}^2 dv \quad (2)$$

여기서 f 는 주파수이고 K_e, K_h 각각 외전류 손실의 계수 및 히스테리시스 손실 계수 이다. D 는 규소강판의 밀도이고, $B_{r,n}, B_{\theta,n}$ 은 n 차 고조파성분의 반경과 주파수의 자속밀도이다[6]. 유한요소해석을 통해 그림 3에 설계 정격 포인트의 자속밀도분포와 철손철손 분포를 나타내었다. 또한 손실 특성을 나타내고 효율을 표기하였다.

표 2 3.7kW 유도전동기의 정격 포인트 유한요소 해석결과
Table 2 The calculated result of IM performance by FEM at rating point

	수치	Unit
상전류	8.49	[Arms]
토크	19.55	[Nm]
정격속도	1760	[rpm]
선간전압	380	[Vrms]
철손	84.3	[W]
동손 [고정자 권선]	203.3	[W]
동손 [회전자 도체]	90.5	[W]
기계손	56.2	[W]
효율	89.6	%
역률	0.72	

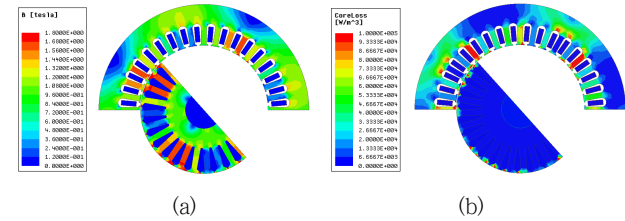
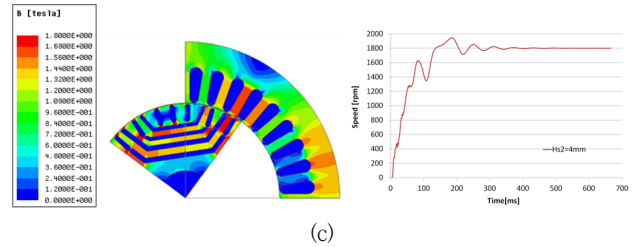
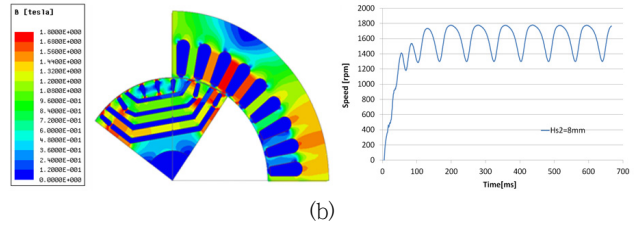
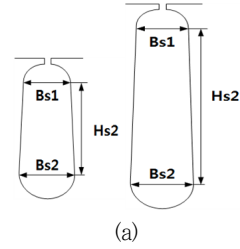


그림 3 정격 포인트 운전 시 유도기 철심 (a) 자속밀도 (b) 철손 분포
Fig. 3 Density distribution with Load (a) flux density (b) core loss density

그림 5 댐핑바 슬롯형상 따른 LS-SynRM의 기동 특성 (a) 두 슬롯 사양 비교 (b) Hs2=4mm 모델의 FEM 해석 (c) Hs2=8mm 모델의 FEM 해석
Fig. 5 LS-SynRM performance changed by rotor slots structure (a) rotor slots design (b) FEM results of rotor slots length Hs2=4mm (c) Hs2=8mm

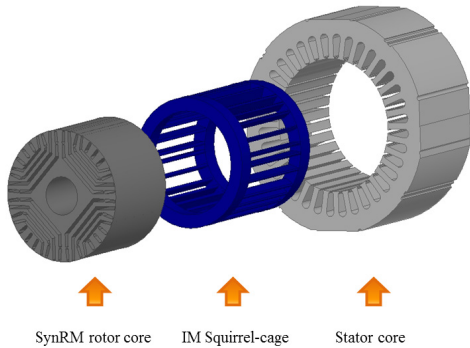


그림 4 일반적인 LS-SynRM의 구조
Fig. 4 Structure of a general-LS SynRM

2.2.1 라인기동식 동기형 릴럭턴스 전동기의 댐핑바 설계

그림 4은 LS-SynRM의 구조를 나타낸 것이다. 고정자는 유도전동기 3상 구조와 마찬가지로 분포권 구조이다. 회전자는 기동토크 확보를 위한 댐핑바와 동기속도 운전시의 릴럭턴스 토크를 발생하는 자속장벽으로 구성되어 있다. 자속장벽은 기동시에는 자기저항의 증가에 따른 자속량 감소, 자기회로의 불평형으로 인하여 회전자의 기동토크 확보가 어려울 수 있다. 따라서 댐핑바의 형상 결정은 LS-SynRM의 중요한 설계 변수가 된다.

댐핑바 슬롯의 길이에 따라 회전자 저항이 크게 변화하게 된다. 회전자 댐핑바 2차측 저항은 식 (3)과 같이 계산할 수 있다.

$$R_{bc} = (\rho_{Al})_{20C} \left[\frac{L_{stk}}{A_b} K_R + \frac{L_{cr}}{2A_{cr} \sin^2(\frac{\pi p_1}{N_r})} \right] \quad (3)$$

여기서 알루미늄 저항률 ρ_{Al} , L_{stk} 는 회전자 축방향 길이, L_{cr} , A_{cr} 는 회전자 엔드턴 길이 및 면적, p_1 및 N_r 는 극상수 및 회전자 슬롯수이다.

2.2 라인기동식 동기형 릴럭턴스 전동기 설계 및 분석

앞서 유도전동기의 발생 손실은 표 2와 같이 나타났다. 고정자 동손은 도체에 전류가 흐름으로써 발생하는 줄열이며 전체 손실의 50%이상 차지하므로 동손을 저감시키기 위해서는 도체 저항의 저감, 혹은 전류당 토크가 최대로 설계하는 방향이 최적 포인트가 된다. 또한 최종 정격 포인트에서 동기속도로 회전함으로써 2차측 동손을 최소화시킨다.

식 (3)을 통해서 확인할 수 있듯이 회전자 2차측 저항을 단계적으로 감소 또는 증가시킬 경우 기동시의 속도-토크특성이 변하고 있다. 또한 2차측 저항이 많이 커지면 정격 토크의 슬립 차가 너무 커지면서 기동을 못할 수 있는 가능성이 존재한다.

그림 5는 회전자 댐핑바 슬롯 길이에 따른 기동특성분석결과를 나타내고 있다. 제작성을 고려해 4mm 및 8mm 슬롯 길이 모델을 분석한 결과 4mm 모델의 2차측 저항이 커서 기동을 못하는 결과가 나타났다.

2.2.2 라인기동식 동기형 릴럭턴스 전동기의 자속장벽 설계

댐핑바 저항에 따른 LS-SynRM 기동특성을 확인한 후 LS-SynRM 정격상태 특성 분석하기 시작하였다. 돌극구조를 가진 형태로서 LS-SynRM 회전자 정격속도에 회전할 때 d축과 q축의 인덕턴스 차이 때문에 릴럭턴스 토크가 발생하였다. 이때 슬롯 주파수가 0이 됨으로써 유도기 댐핑바에 발생하는 로렌츠 Force

는 사용하지 않게 된다. 이러한 LS-SynRM의 정상상태 특성 향상을 위해서는 d-q축 돌극비를 충분히 확보하여야 하므로 d축 인덕턴스(자화 인덕턴스)의 증가를 위해 q축 자속은 작게 만들어야 한다. 자속장벽은 파라미터 설계를 통해 최대 인덕턴스 비를 얻은 것을 설계 목표로 정하였다.

주요설계 변수는 자속장벽(Barrier) 개수, 각 자속장벽의 밀면 길이, 자속장벽의 각, 립(rib) 두께 브릿지(bridge) 두께 등 있다.

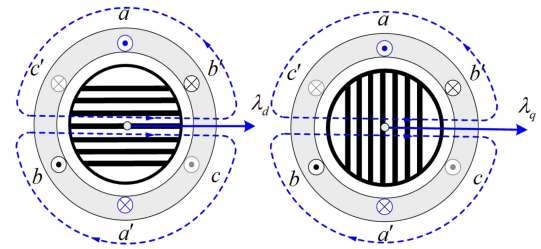


그림 6 돌극비를 계산하기 위해 간편한 쇄교자속 계산법
Fig. 6 Saliency Ratio calculation method with D-q flux

표 3 설계 목적함수와 설계 변수의 인자
Table 3 Object functions and design variables

자속장벽의 수		자속장벽의 두께	
자속장벽 수가 너무 적으면 q축 자속이 많이 흐르게 된다. 자속장벽 수가 많아지면 세그먼트가 얇아져 포화의 우려가 있고, 회전자 기계적인 구조(강성) 때문에 제한을 받게 된다.		자속장벽이 두꺼우면 q축자속이 감소하며 q축 인덕턴스가 감소하게 된다. 하지만 자속장벽수와 마찬가지로 자속장벽이 너무 두꺼워지면 회전자 기계적인 구조 때문에 고속운전 시 비산이 발생 될 수 있다.	
세그먼트의 두께		안쪽 자속장벽의 위치	
고정자 치에 세그먼트를 맞추기 위해 회전자 밖으로 갈수록 세그먼트의 두께를 점점 줄이면 더 많은 자속을 받을 수 있고 토크리플을 줄일 수 있으나, 설계가 복잡하고 제작이 어렵다.		가장 안쪽 자속장벽의 위치에 따라 세그먼트의 길이가 변화하게 된다. 이는 회전자 크기와 자속장벽 두께 개수에 따라 제한 될 수 있다.	
자속장벽과 댐핑바 슬롯의 배치			
자속장벽이 댐핑바의 상대 위치 정렬시 립을 통해서 발생하는 누설자속을 최소화하여 돌극비 향상 할 수 있다.			

또한 자속장벽 및 댐핑바 슬롯의 상대 위치에 따라 누설자속량의 크기가 변화하며 인덕턴스 비율이 변하게 된다.

기존의 유한요소법을 이용한 설계는 시간이 너무 오래 걸리는 단점이 있었다. 본 논문에서는 이를 단축시키기 위해 Transient 해석이 아닌 회전자 정지 상태를 고려하였다. 고정자 A상 권선에 직류 전류를 인가하고, 기자력 방향을 회전자 d축, q축에 각각 정렬하고 이때 발생하는 d축, q축 쇄교자속량의 비를 이용하여 간편하게 돌극비를 계산하였다[7] [8].

이는 그림 6에 나타나있다. FEA를 통해서 인덕턴스 비가 구해지고, 설계변수가 목적함수에 얼마나 영향을 미치는지 알 수 있는 Main Effect 분석을 통해 각각의 변수들의 중요도를 판단할 수 있다. 그림 8은 인덕턴스 비 각각의 Main Effect Plot을 나타낸다. 그림 8에 나타나는 결과를 분석해 보면 먼저 인덕턴스 비를 동시에 향상시켜주는 변수는 영향이 큰 순으로 “자속장벽 개수”, “자속장벽 두께”와 “자속장벽과 댐핑바 슬롯 배치의 정렬 각도” 3개이다.

‘자속장벽의 두께’는 설계목적 함수에도 중요한 인자이며 자속장벽이 3mm보다 커지면 q축 자속과 세그먼트의 포화 사이에 자속이 포화되는 것을 알 수 있다. ‘안쪽 자속장벽의 위치’, ‘세그먼트의 두께’는 인덕턴스에 큰 영향을 미치지 않음을 확인할 수 있다.

표 3과 같이 회전자 설계를 바탕으로 더 높은 효율을 만족하도록, 쇄교자속에 의한 역기전력을 2D 유한요소법을 통하여 계산하고 마지막으로 세그먼트 두께는 공정의 편의를 위해 같게 설계하였다. 최종 설계된 회전자의 주요 치수를 표 4에 정리하였다. 설계된 LS-SynRM 및 유도전동기의 정격포인트 특성을 비교하

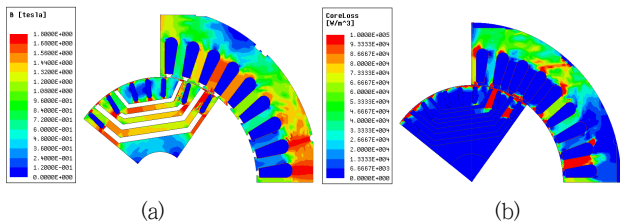


그림 7 정격 포인트 운전 시 LS-SynRM 철심 (a) 자속밀도 (b) 철손분포

Fig. 7 Density distribution with Load (a) flux density (b) core loss density

면 최적설계된 LS-SynRM 모델의 돌극비가 최대화되었으므로 출력밀도는 유도전동기보다 크다. 또한 유도전동기보다 고정자 동손이 감소하였다.

유도전동기와 LS-SynRM의 철손은 정격속도 및 동기속도에서 철심의 자속밀도에 비례한다. LS-SynRM에서는 구조상 회전자 최대 돌극비를 만들기 위해, 회전자 자속장벽 구조가 최적설계되어야 하며, 자속장벽 및 댐핑바의 사이즈 크기가 유도전동기 회전자 댐핑바 슬롯의 면적보다 크기 때문에 LS-SynRM 철심의 자속밀도가 유도전동기 보다 크다. 따라서 유도전동기의 철손보다, LS-SynRM 철손이 크게 나타난다. 그림 7(b)에 LS-SynRM 철심의 철손 분포도 제시하였다. 그렇지만 LS-SynRM은 회전자에 농형 알루미늄 댐핑바가 동기속도 운전시 슬립 주파수 0이어서 2차측 동손이 크게 발생하지 않는다. 설계 최종결과에서 LS-SynRM의 효율은 91.3%로 유도전동기보다 1.7% 이상 증가시켰다.

표 4 3.7kW LS-SynRM의 정격 포인트 유한요소 해석결과
Table 4 The calculated result of LS-SynRM performance by FEM at rating point

모델링		LS-SynRM	Unit
LS-SynRM 설계	극수	4	
	자속장벽 수	4	
	자속장벽의 두께	3	mm
	세그먼트의 두께	4	mm
	안쪽 자속장벽 위치	6	mm
	댐핑바 및 자속장벽의 정렬각도	0	deg
유한요소 해석	상전류	8.68	[Arms]
	토크	20.3	[Nm]
	정격속도	1800	[rpm]
	선간전압	380	[Vrms]
	철손	120.5	[W]
	동손 [고정자 권선]	179.51	[W]
	동손 [회전자 도체]	17.8	
	기계손	36	[W]
	효율	91.3	%
	역률	0.71	

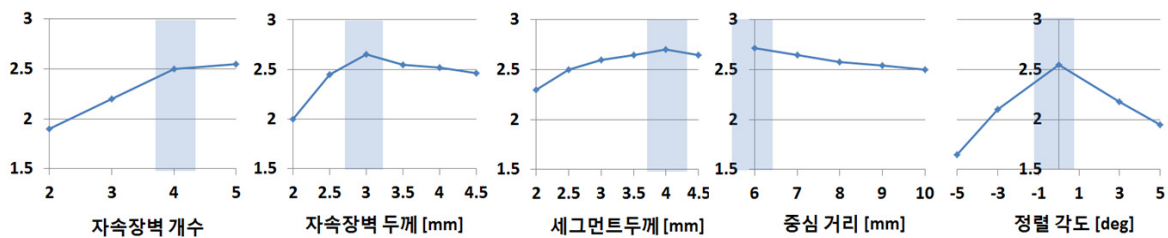


그림 8 LS-SynRM 목적함수에 대한 Main Effect Plot 인덕턴스 비

Fig. 8 LS-SynRM Main effect plot by DOE (inductance proportion)

3. 라인기동식 동기형 릴럭턴스 전동기의 실험결과 비교

그림 9(a)는 최종 설계 된 LS-SynRM의 기본 코어 구조를 보여주며, 그림 9(b)는 부하시험 세팅을 보여준다. 시험을 통한 유도전동기와 LS-SynRM의 부하율에 따른 효율 비교를 표 5에 나타내었다. 유도전동기의 부하율 당 토크 데이터와 일정하게 LS-SynRM을 구동하여 비교 분석하였으며 이는 같이 정상상태 도달이 가능하다.

또한 유도전동기 및 LS-SynRM 부하율에 따른 효율을 비교하면 부하율이 감소할수록 철손 대 동손 비율이 증가하였다. 따라서 경부하(25%)일 때 효율은 철손에 대한 영향이 커지게 되어 유도전동기 효율이 LS-SynRM 보다 높음을 보였다.

표 5 유도전동기 및 LS-SynRM 부하율에 따른 효율 계산
Table 5 IM and LS-SynRM performance with different load curve

		3.7kW 유도전동기					
부하율[%]		25	50	75	100	110	125
토크[Nm]		4.45	9.55	14.55	19.55	21.55	24.55
전류[A]		4.85	5.80	7.02	8.49	9.12	10.10
속도[rpm]		1792	1782	1771	1760	1757	1749
효율[%]		83.7	89	89.9	89.6	89.4	88.7

		3.7kW LS-SynRM					
부하율[%]		25	50	75	100	110	125
토크[Nm]		4.98	9.81	14.70	19.60	21.58	24.52
전류[A]		4.51	5.64	7.08	8.78	9.54	10.75
속도[rpm]		1800	1800	1800	1800	1800	1800
효율[%]		83.6	89.4	90.7	90.7	90.5	90

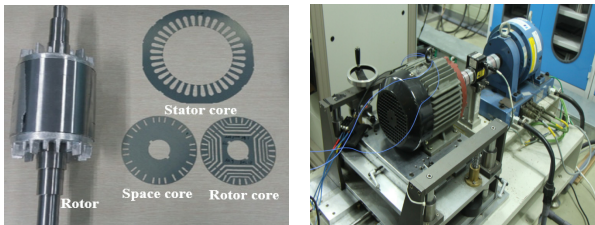


그림 9 LS-SynRM 제작 및 시험 순서도
Fig. 9 Rotor and stator of conventional model in LS-SynRM and experiment setup

4. 결 론

본 논문은 블로워용 3.7kW 유도전동기를 대체하기 위한 고효율 라인기동식 동기형 릴럭턴스 전동기의 복잡한 회전자 구조를 적용하는 설계법을 제안하였다. 기동특성을 확보하기 위해 댐핑바의 설계법을 검토하고, 정상상태 운전시 토크와 출력을 최대화

하기 위해 유한요소 해석을 통해 돌극비의 최적점을 찾아 회전자 자속장벽 형상을 결정하여 라인 기동식 동기형 릴럭턴스 전동기를 설계하였다.

라인 기동식 동기형 릴럭턴스 전동기 모델을 제작하고 시험을 통해, 목표 효율을 달성함으로써 제작된 동기 릴럭턴스 전동기가 유도전동기를 대체할 수 있는 고효율 달성하였음을 보였다.

추가적으로 회전자 강성 안전율을 높이고, 차등 자속장벽 적용, 양산을 위한 회전자 금형의 추가적인 설계 방안이 남아있다. 또한 철손영향을 인해 경부하시 유도전동기 보다 효율 낮은 설계 결과가 있다. 따라서 추후에는 위와 같은 사항 등을 고려하여 경부하시 라인기동식 동기형 릴럭턴스 전동기의 효율을 개선 설계할 예정이다.

감사의 글

이 성과는 2016년도 정부(미래창조과학부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 연구임 (No.2016R1A2A1A05005392)
본 연구는 국토교통부 철도기술연구사업의 연구비지원 (16RTRP-B067916-04)에 의해 수행되었습니다.

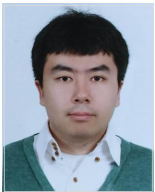
References

- [1] Y. D. Chun D. H. Koo "Technical trend of High efficiency MEPS in Korea", The Proceedings of the Korean Institute of Illuminating and Electrical Installation Engineers, Vol. 25, No. 6, pp. 26-37, 2011.
- [2] Anibal De Almeida "European Ecodesign Lot 30: new ideas for advanced MEPS" 2014.
- [3] H. C. Liu, H. J. Lee, S. Y. Oh, G. H. Ryu, H. S. Hong, S. J Kim, J. Lee "Decrease torque ripple for super premium SynRM using barrier arrangement design," Electrical Machinery & Energy conversion system society annual spring conference 2013.
- [4] I. Boldae "Reluctance Synchronous Machines and drives," pp. 46-47
- [5] 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.
- [6] J. H. Ahn, S. Y. Jung "Numerical design characteristics of induction motor considering voltage and current source" Electrical Machinery & Energy conversion system society annual spring conference 2013.
- [7] W. H. Kim "A Study on the Optimal Design Method of

Synchronous Reluctance Motor for the High Torque and Power Factor” Hanyang University 2007.

- [8] H. C. Liu, I. G. Kim, J. M. Jeong, J. Lee “Study on the High Efficiency design of IE4 Synchronous Reluctance Motor Replacing IE3 induction motor”, The Transactions of the Korean Institute of Electrical Engineers Vol.65 No. 3, pp. 411-418, 2016.

저 자 소 개



유 회 총 (Huai-Cong Liu)

1988년 8월 29일생. 2012년 충남대학교 전기공학과 졸업. 2012년~현재 한양대학교대학원 전기공학과 석박사 통합과정.



이 상 돈 (Sang-Don Lee)

1981년 한양대학교 전기공학과 졸업. 1987년 동 대학원 전기공학과 졸업(석사). 1996년 동 대학원 전기공학과 졸업(박사). 현재 강릉원주대학교 전기공학과 교수.



이 주 (Ju Lee)

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