

## 동기형 릴럭턴스 전동기의 토크와 역률 최대화를 위한 회전자 설계 기법

(A Method to Design the Rotor of Synchronous Reluctance Motors for Maximum Torque and Power Factor)

김원호\*

(Won-Ho Kim)

### Abstract

This paper propose a method to design the rotor of synchronous reluctance motors(SynRM) for maximum torque and power factor by using DOE(design of experiment) with the design variables which are parameters of barriers and segments. In this process, there are problems that require lots of simulation time and number of simulations when calculating the both torque and power factor using the finite element method in order to find load angle, core loss per speed. In order to improve this problem, we calculate only value of flux linkage by finite element method, and can decrease analysis and the number of analysis time by applying steady state expression of the power factor and torque. Finally, in order to verify the characteristics of optimal model, we make prototype motor and compare with the conventional SynRM. In this experiment, we use the DC current decay test for calculating d- and q-axis inductance.

Key Words : Synchronous Reluctance Motor, Flux Linkage

### 1. 서 론

동기형 릴럭턴스 전동기(Synchronous reluctance motor - 이하 SynRM)는 회전자 돌극 구조에 의한

릴럭턴스 토크가 발생하는 전동기로서 회전자에 영구 자석이나 권선이 없어 구조가 간단하다. 고정자 권선은 일반적인 3상 정현파 분포를 가지므로 기존 교류전동기의 고정자를 그대로 이용할 수 있어 경제적이다. 또한 정현파 회전자계에 의한 정현파 전류가 인가되어 정현적으로 회전하는 공극 기자력을 발생시킴으로써 스위치드 릴럭턴스 전동기에 비해 토크 맥동 및 소음 등을 줄일 수 있어 유연한 토크 특성 및 정속 운전이 가능하다[1-3].

그림 1은 SynRM의 대표적인 형태인 단편형으로 코어를 편칭하여 길이 방향으로 적층하며 단편간의 기

---

\* 주저자 : 삼성전자 종합기술원 전문연구원  
\* Main author : Samsung Advanced Institute of Technology, Research Staff Member  
Tel : 010-9856-1535, Fax : 031-280-9158  
E-mail : wonho79@nate.com  
접수일자 : 2013년 10월 1일  
1차심사 : 2013년 10월 8일, 2차심사 : 2013년 10월 22일  
심사완료 : 2013년 10월 27일

계적인 유지를 위하여 리브(Rib)가 존재한다. 자기적 돌극을 위한 자속장벽은 비어있으며 따라서 제작이 용이하고 재료비가 싸다. 또한 열적 문제와 구조적 강건함으로 고속 또는 장시간 운전이 가능하다.

위와 같은 장점으로 SynRM의 고효율화 및 토크 밀도 향상을 위한 많은 연구가 진행되고 있으나 간단한 회전자 구조 등의 이유로 회전자의 설계보다는 제어에 대한 연구가 많이 이루어졌다[4-6].

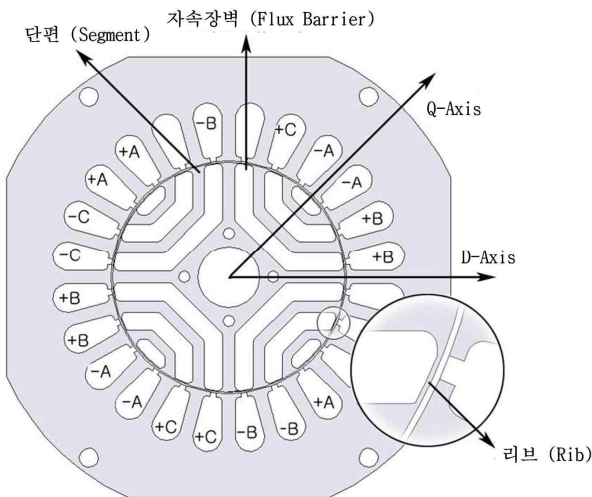


그림 1. 단편형 SynRM의 단면도  
Fig. 1. Cross-sectional diagram of the segment type SynRM

일반적으로 자속장벽 사이의 누설자속과 단편의 자기 포화 때문에 자기 회로를 이용한 분석적인 방법으로 SynRM의 회전자를 설계하는 것은 어렵고 형상에 따라 부정확한 경우가 많다. 또한 유한요소법을 이용해 토크와 역률 등을 모두 해석해서 원하는 파라미터를 결정하는 방식은 부하각 산정 등이 필요해 너무 많은 해석 횟수와 시간이 소모된다[7-9].

본 논문에서는 SynRM의 토크와 역률이 인덕턴스 차와 인덕턴스 비에 비례하는 것을 이용하여 회전자 설계를 수행하는 방법을 제안한다. 이 때 유한요소법은 단지 고정 전류에서의 쇄교 자속량만을 계산하고 실험계획법을 활용함으로써 최소한의 해석으로 주요 성능에 영향을 미치는 회전자 파라미터를 분석하고 이를 바탕으로 최종 모델을 도출한다.

## 2. 토크와 역률을 고려한 회전자 설계

### 2.1 기존 모델 사양

기존 SynRM의 회전자, 고정자 형상은 그림 2에 나타내었으며, 권선 레이아웃과 상세 사양은 그림 3, 표 1과 같다.

본 논문에서는 기존 모델과 동일한 고정자를 사용하고 회전자 형상만을 설계하여 토크와 역률을 향상시키려고 한다.

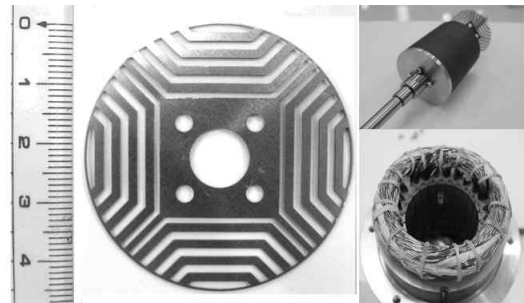


그림 2. 기존 SynRM의 회전자, 고정자  
Fig. 2. Rotor, stator of the conventional SynRM

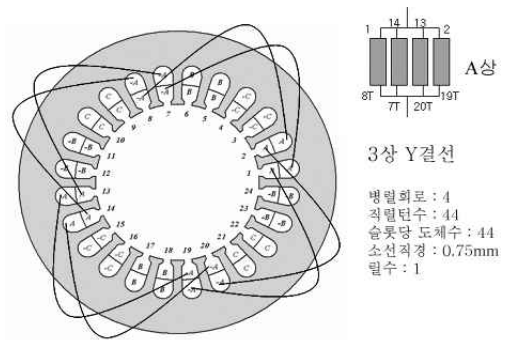


그림 3. 기존 SynRM의 권선도  
Fig. 3. Winding layout of the conventional SynRM

표 1. SynRM 공통 사양 및 목표  
Table 1. Shared specification and target value of the SynRM

항목	값	단위
고정자 외경	86	mm
고정자 내경	47	mm
샤프트 반경	5	mm

항목	값	단위
축방향 길이	40	mm
상 수	3	
극 수	4	
슬롯수	24	
점적률	40	%
상저항	0.0965	ohm
정격 전류	10.5	A <sub>rms</sub>
정격 토크	0.5 ↑	Nm
정격 속도	1,000	rpm
효율	53 ↑	%

### 2.2 SynRM의 토크, 역률과 인덕턴스 계산

SynRM의 토크와 역률은 정상상태의 폐회로도를 이용하여 다음과 같이 계산할 수 있다[10].

$$T = \frac{3}{2} \frac{P}{2} (L_d - L_q) i_d i_q \quad (1)$$

$$PF = \left( \frac{L_d}{L_q} - 1 \right) / \left( \frac{L_d}{L_q} + 1 \right) \quad (2)$$

여기서  $T$ : 토크,  $PF$ : 역률,  $P$ : 극수  
 $L_d, L_q$ : d, q축 인덕턴스,  $i_d, i_q$ : d, q축 전류

식 (1), (2)에서 토크는 d축과 q축의 인덕턴스 차에, 역률은 인덕턴스 비에 비례함을 알 수 있다. 따라서 SynRM의 d축과 q축 인덕턴스를 계산할 수 있다면 정상상태의 토크와 역률을 회전자 설계시 동시에 고려할 수 있게 된다.

d축과 q축 인덕턴스는 식 (3), (4)로 계산할 수 있으며 이 때 각 상권선의 쇄교자속은 A상에 최대 전류가 흐르도록 고정된 3상 전류를 인가시키고, 회전자를 일정하게 회전시키는 방법으로 유한요소법을 통해 얻을 수 있다. 유한 요소법으로 분석한 각 상권선의 쇄교자속 파형은 그림 4와 같으며 A상 권선 쇄교자속의 최대, 최소값만을 이용하여 효율, 역률의 계산이 가능하다.

$$L_d = \frac{3}{2} \frac{\lambda_{aa\_max}}{I} \quad (3)$$

$$L_q = \frac{3}{2} \frac{\lambda_{aa\_min}}{I} \quad (4)$$

여기서  $I$ : 인가 전류의 실효값

$\lambda_{aa\_max}, \lambda_{aa\_min}$ : A상 권선의 쇄교자속 최대, 최소값

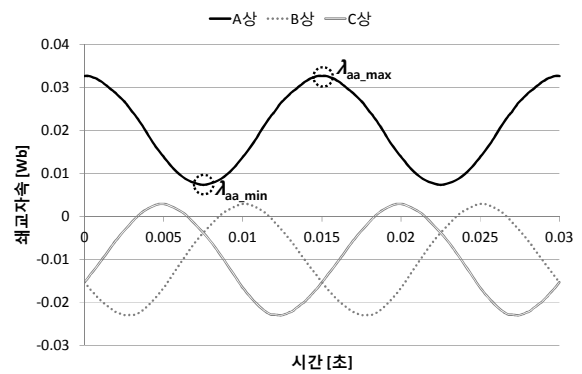


그림 4. 유한요소법으로 계산된 쇄교자속 파형  
 Fig. 4. Flux linkage waveform calculated by FEM

### 2.3 시험계획법을 이용한 파라미터 분석

시험계획법(Design of Experiments)은 모델의 특성에 영향을 미치는 여러 가지 인자를 선정하고 이들의 관계를 알아보기 위한 실험을 실시하여 모델의 최적 조건을 효율적으로 찾아내는 기법이다[11].

SynRM에서 토크와 역률에 영향을 미치는 회전자의 설계변수는 여러 가지가 있다. 이들 설계변수의 조합으로 나오는 많은 설계 모델들을 유한요소법을 이용하여 해석하여 최적모델을 찾는 설계 방법은 적지 않은 시간이 소요될 뿐만 아니라 각 설계변수의 영향력 등을 정확히 알 수 없는 단점이 있다. 이에 본 논문에서는 토크와 역률을 최대화할 수 있는 설계목적함수를 정하고 이와 관련된 설계변수의 조합으로 나오는 해석모델의 개수를 시험계획법을 이용하여 최소화하고, 이렇게 줄어든 모델들을 유한요소법으로 해석하여 목적함수에 가장 큰 영향을 미치는 주요인을 선정하였다.

설계목적함수는 인덕턴스 차와 인덕턴스 비의 최대값으로 설정하고, 2.2절에서 제안된 방식을 이용하여 해석 횟수를 최대한 줄였다. 설계변수는 이 설계목적함수에 영향을 미칠 것으로 예상되는 회전자의 설계 인자들 중 6개를 선정하고 각각의 수준을 나누었다. 표 2에 설계변수의 수준과 선정 이유를 정리하여 나타내었다.

표 2. 회전자 설계변수  
Table 2. Design variable of the rotor

리브의 두께 (2수준)	
0.2mm	0.5mm
<ul style="list-style-type: none"> <li>- 리브가 두꺼우면 q축의 인덕턴스가 증가</li> <li>- 리브가 얇으면 공정이 힘들고, 고속운전시 단편에 가해지는 원심력에 의하여 리브가 비산될 수 있음</li> </ul>	
2. 자속장벽의 수 (2수준)	
3개	5개
<ul style="list-style-type: none"> <li>- 자속장벽 수가 적으면 q축 자속이 많이 흐름</li> <li>- 자속장벽 수가 많아지면 회전자의 기계적인 구조 때문에 제한을 받음</li> </ul>	
3. 자속장벽 바닥의 위치 (2수준)	
10mm	8.5mm
<ul style="list-style-type: none"> <li>- 자속장벽의 바닥위치에 따라 단편의 길이가 변화하게 되어 d축과 q축에 흐르는 자속 경로 역시 변화</li> <li>- 회전자 크기와 자속장벽 두께, 개수에 따라 제한</li> </ul>	

4. 단편의 두께 (2수준)	
Same	Different

- 고정자의 치에 단편들을 맞추기 위해 회전자 밖으로 갈수록 단편의 두께를 점점 줄이면 더 많은 자속을 받을 수 있고 토크 리플이 줄어들음

5. 공극의 두께 (2수준)	
0.4mm	0.6mm

- 공극에서 고속회전 시 회전자의 리브와 단편 구조가 원심력에 견디지 못하고 팽창되어 고정자와 마찰할 수 있기 때문에 너무 작은 공극은 고려하지 않음

6. 자속장벽과 단편의 두께비 (3수준)		
2:3	1:1	3:2

- 자속장벽이 두꺼우면 q축 자속은 감소하지만 단편이 얇아져서 포화되기 쉬움  
- 자속장벽이 얇아지면 q축 자속은 증가하지만 단편이 두꺼워져 d축 자속도 증가

시뮬레이션을 통해 얻은 결과를 바탕으로 두 설계목적함수를 동시에 만족시킬 수 있는 설계변수를 찾기 위해 평균값을 이용한 분산분석법을 사용하였다. 그림 5는 분산분석법을 사용하여 나타낸 주요인 분석도이다.

이를 바탕으로 결과를 분석해 보면 먼저 인덕턴스 차와 비를 동시에 향상시켜주는 변수는 영향이 큰 순으로 '자속장벽과 단편의 두께비', '공극의 두께', '자속장벽의 수' 3개이다.

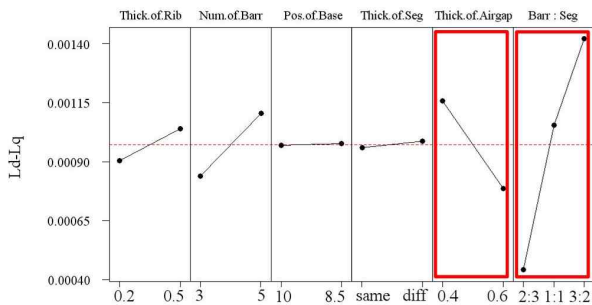
‘자속장벽과 단편의 두께비’는 설계목적함수에 가장 중요한 인자이며 자속장벽이 단편보다 1.5배 정도 크게 설계하는 것이 q축 자속과 단편의 포화 사이의 적절한 타협점을 알 수 있다.

‘공극의 두께’는 역시 작을수록 토크와 역률에 좋으나 기계적 강성을 고려해서 적절한 값을 찾아야 할 것이다.

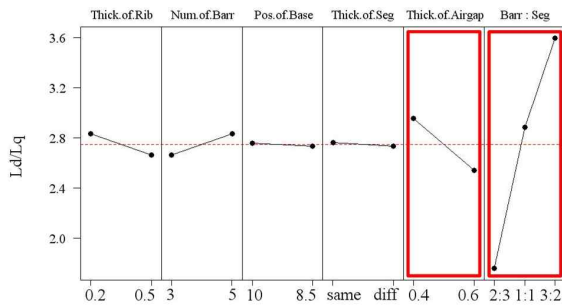
‘자속장벽의 수’는 클수록 좋으나 토크에 비해 역률에는 영향력이 작음을 알 수 있다.

‘리브의 두께’는 크게 하면 토크는 좋아지나 상대적으로 역률은 나빠진다. 리브의 두께가 두꺼워지면 q축 인덕턴스가 증가하나 d축의 측면에서도 자속을 받아들여 d축 인덕턴스도 같이 증가하게 되어 이런 결과가 발생하였다. 추후 수준을 더 나누어 적절한 리브의 두께를 세밀히 확인할 필요성이 있다.

‘자속장벽 바닥의 위치’와 ‘단편의 두께’는 인덕턴스에 큰 영향을 미치지 않음을 확인할 수 있다.



(a) 인덕턴스 차  
(a) inductance difference



(b) 인덕턴스 비  
(b) inductance ratio

그림 5. 주요인 분석 결과  
Fig. 5. Results of the main effect analysis

## 2.4 최종 모델

토크와 효율을 동시에 높여주는 3개의 인자는 결과 값을 그대로 활용하였고, 리브의 크기는 두 수준의 중간값을, 자속장벽 바닥의 위치는 단편 개수와 두께 등을 고려하여 조정하였다. 마지막으로 단편 두께는 공정의 편의를 위해 같게 설계하였다. 표 3에 최종 모델의 사양을 나타내었고 그림 6에 최종 모델의 형상과 자속밀도 분포를 나타내었다.

표 3. 제안모델의 최종 파라미터값  
Table 3. Final parameters of the proposed model

항목	값	항목	값
리브 두께	0.3mm	단편 두께	Same
공극 두께	0.4mm	자속장벽과 단편비	3:2
자속장벽 바닥위치	9mm	자속장벽 수	5개

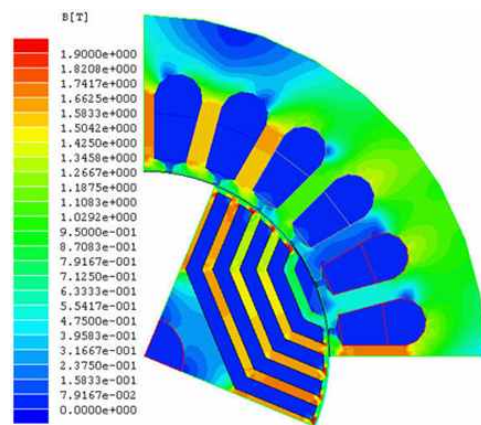


그림 6. 제안 모델의 자속밀도분포  
Fig. 6. Flux density distribution of the proposed model

## 3. 제작 및 시험

### 3.1 제작 및 시험 장비

제안한 회전자 설계의 타당성 검증을 위하여 제한 모델을 제작하고 기존 모델(그림 2)과 제한 모델의 성

능 시험을 수행하였다. 제작된 전동기는 그림 7과 같으며, 시험 장비 세트는 그림 8에 나타내었다.

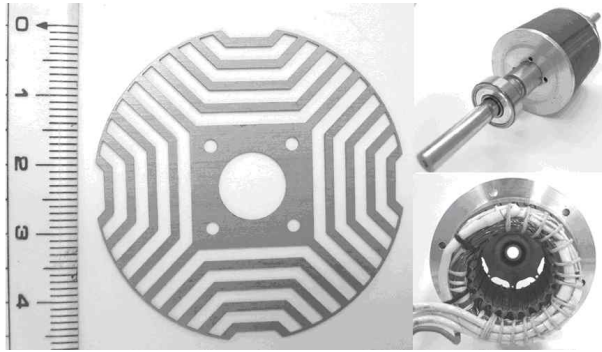


그림 7. 제안된 SynRM의 회전자, 고정자  
Fig. 7. Rotor, stator of the proposed SynRM

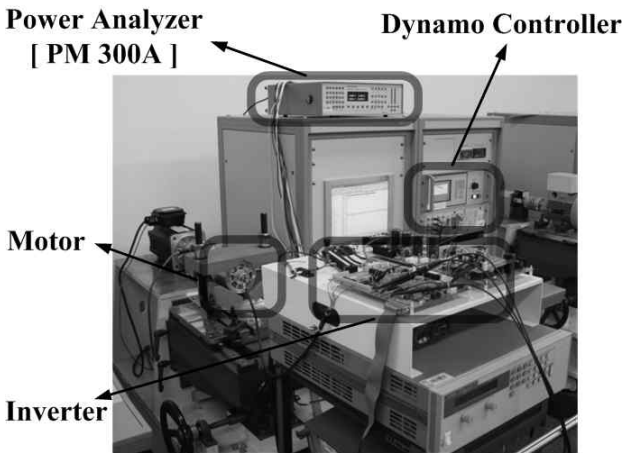


그림 8. 시험 장비  
Fig. 8. Test set

### 3.2 인덕턴스 비교

인덕턴스를 측정하는 방법이 여러 가지 방법으로 개발되어 시도되고 있다. 본 시험에서는 그 중 비교적 간단히 측정할 수 있으며 앞에서 유한요소법으로 시뮬레이션 조건과 비슷한 방식인 전류의 포화를 고려할 수 있는 직류 전류 감소 시험법을 이용하여 인덕턴스를 측정하였다. 직류 전류 감소 시험법은 고정자 a 상에 회전자를 d축 또는 q축으로 고정시키고, a상의 dc 전류가 초기치에서 영(zero)까지 감소하는 것을 측정하여 인덕턴스를 구하는 시험법이다[12].

앞의 시험 방법으로 전류를  $5A_{dc}$  간격으로  $5A_{dc} \sim 20A_{dc}$ 까지 변화시켜 가며 최적 설계된 전동기와 기존 전동기의 인덕턴스를 계산하고 그 결과를 비교하여 그림 9에 나타내었다. 결과를 보면 q축 인덕턴스는 큰 차이가 없으나, d축 인덕턴스는 제안모델이 기존모델보다 모든 전류 범위에서 커졌음을 확인할 수 있다. 또 우리가 회전자 설계시 목표로 했던 인덕턴스 차와 인덕턴스 비의 결과를 기존 모델과 비교하여 그림 10에 나타내었다. 역시 제안 모델이 기존 모델보다 인덕턴스 차와 인덕턴스 비 모두 향상되었음을 알 수 있다.

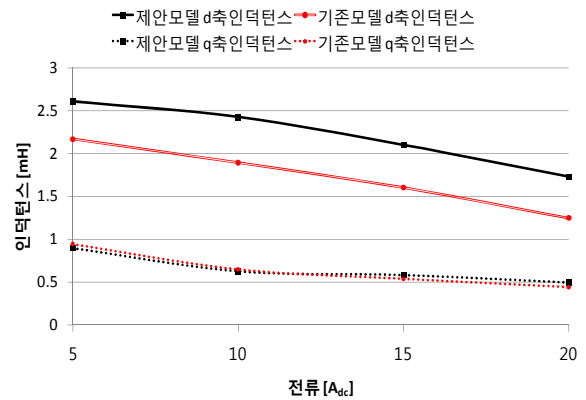


그림 9. 직류 전류 감소 시험법을 이용한 인덕턴스 비교  
Fig. 9. Comparison of inductance by DC current decay test

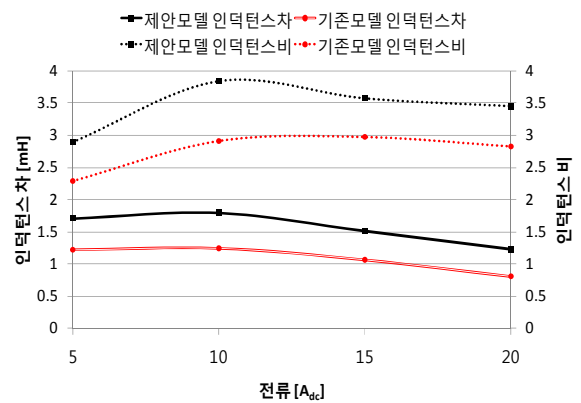


그림 10. 제안모델과 기존모델의 인덕턴스 차와 인덕턴스 비 비교  
Fig. 10. Comparison of inductance difference and ratio

### 3.3 부하각별 파라미터 비교

마지막으로 정격 전류  $10A_{rms}$ 에서 부하각별 최대토크 및 역률을 측정하여 그림 11, 12에 나타내었다. 두 모델 모두 최대토크는 부하각 45도 부근에서 발생하고 최대 역률은 부하각 60도 부근에서 발생하며 부하각 전 범위에서 토크와 역률이 개선되었음을 확인할 수 있다. 이를 통해 제안된 토크와 역률 향상을 위한 회전자 설계 기법이 유효함을 확인할 수 있다.

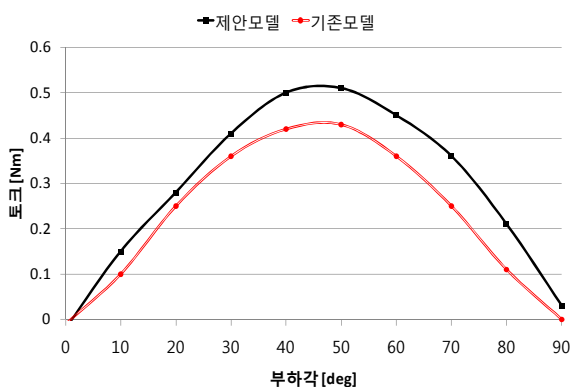


그림 11. 부하각별 토크 비교  
Fig. 11. Comparison of torque per load angle

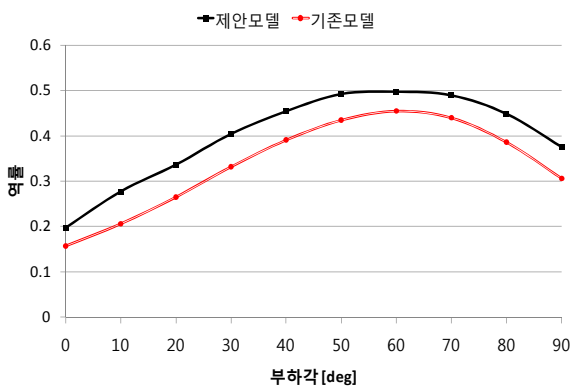


그림 12. 부하각별 역률 비교  
Fig. 12. Comparison of power factor per load angle

## 4. 결 론

본 논문은 SynRM의 토크와 역률의 최대화를 위한

회전자 설계를 제안하였다. 이 때 부하각별 토크 등을 모두 해석하지 않고 쇄교 자속만을 유한 요소법으로 계산하여 실험계획법에 반영하는 방법을 적용함으로써 시뮬레이션 횟수 및 해석 시간을 단축시킬 수 있었다. 또한 SynRM의 회전자 파라미터 중 토크와 역률에 영향을 미치는 인자를 분석하고 이를 반영하여 최종 모델을 도출하고 시작품을 만들어 시험을 수행하였다. 시험 결과 기존 모델 대비 인덕턴스 차, 인덕턴스 비, 토크, 역률이 모두 개선되어 제안한 설계 기법이 타당함을 확인하였다.

마지막으로 본 논문에서 제안하는 회전자 설계 방식은 마그네틱 토크 뿐만 아니라 릴럭턴스 토크까지 사용되는 매입형 영구자석 전동기 회전자 설계에도 적용 가능할 것으로 사료되며, 제안한 방식을 응용하여 다른 성능 지표(효율, 토크 리플, 기동 토크 등)에 확대 적용하는 방법과 실험계획법 활용에서 주요인 분석 이후 반응 표면법과 같은 최적화 기법 등이 추가적으로 연구되어야 할 것으로 사료된다.

## References

- [1] A. Vagati, T. A. Lipo, I. Boldea, T. Fukao, L. Malesani and T. J. E. Miller, "Synchronous Reluctance Motors and Drives A New Alternative," IEEE-IAS, pp.1.1-1.3,1994.
- [2] I. Boldea, Reluctance Synchronous Machines and Drives, Oxford, U.K.: Clarendon/Oxford,1996.
- [3] Heath Hofman, Seth R. Sanders, "High-Speed Synchronous Reluctance Machine with Minimized Rotor Losses," IEEE Trans.on Ind.Vol.36, no.2, pp.531-539, 2000.
- [4] Jin-Gook Lee, Jae-Sub Ko, Sung-Jun Kang, Mi-Geum Jang, Sun-Young Kim, Ju-Hui Mun, Dong-Hwa Chung,, "Efficiency Optimization Control of SynRM with FNPI Controller," Proceedings of KIEE Annual Conference, pp. 239-240, 2011. 5.
- [5] Jung-Sik Choi, Jae-Sub Ko, Mi-Geum Jang, Dong-Hwa Chung, "Efficiency Optimization Control of SynRM Drive using Multi-AFLC," Journal of the Korean Institute of Illuminating and Electrical Installation Engineers, vol.24, no.5, pp. 44-54, 2010.
- [6] Seung-Joo Kim, Jong-Bin Im, Sung Chul Go, Jae-Nam Bae, Won-Ho Kim, Kwang-Soo Kim, Cheri-Jin Kim and Ju Lee, "Robust Maximum Torque per Ampere (MTPA) Control of PM-Assisted SynRM for Traction Application," IEEE Trans.on Mag. Vol.46, no.9, pp.3705-3708, 2010.
- [7] D.A.Staton, T.J.E.Miller, S.E.Wood, "Maximising the saliency ratio of the synchronous reluctance motor", IEE Proceedings-B, Vol. 140, No4, pp249-259 July 1993.

- [8] Vagati. A., Franceschini. G., Marongiu. I., Trogia. G.P, "Design criteria of high performance synchronous reluctance motors", Conference Record of the 1992 IEEE vol. 1, pp 66-73 Oct. 1992.
- [9] Kyung-II Woo, "Torque Characteristics Analysis of Synchronous Reluctance Motor by Winding Function Theory," Journal of the Korean Institute of Illuminating and Electrical Installation Engineers, vol.25, no.7, pp. 26-31, 2011.
- [10] T.Matsuo and T.ALipo, "Rotor Design Optimization of Synchronous Reluctance Machine", IEEE Transactions of Energy Conversion, Vol.9, Issue.2, pp.359~365, 1994.
- [11] Gi-Hae Shin, Sang-Bin Song, Jae-Min Sim, Ki-Hoon Kim, Kwang-Cheol Lee, Jae-Pil Kim, "Control of emitting spectrum by design of experiments," Proceedings of KIIEE Annual Conference, pp. 125-128, 2009. 5.
- [12] Turner, P.J., Reece, A.B.J., MacDonal, D.C., "The DC decay test for determining synchronous machine parameters: measurement and simulation", IEEE Transactions of Energy Conversion, Vol.4, Issue.4, pp.616~623, 1989.

◇ 저자소개 ◇



**김원호 (金元顥)**

1979년 12월 28일생. 2005년 한양대학교 전자전기공학부 졸업. 2009년 한양대학교 전기공학과 졸업(석사). 2011년 한양대학교 전기공학과 졸업(박사). 현재 삼성전자 종합기술원 전문연구원 재직중.