

슈퍼프리미엄급(IE4급) 동기 릴럭턴스 전동기의 회전자 형상 설계 연구

정년기*, 유회총*, 박승이*, 김 솔**, 이 주*

A Study on the Rotor Design of IE4 Class Synchronous Reluctance Motor

Nyeon-ki Chung*, Huai-Cong Liu*, Song-I Pack*, Sol Kim**, Ju Lee*
Hanyang University*, Yuhan University**

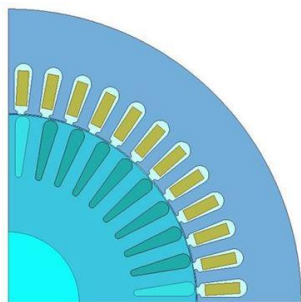
Abstract - 현재 세계는 각종 에너지에 대한 연구가 치열하게 진행되고 있는 가운데 각 기계들의 에너지 효율등급이 엄격하게 규제되고 있다. 전동기 분야에서는 사용 용도에 따라서는 영구자석을 쓰지 않는 유도기가 주목을 받았다. 하지만 유도전동기는 가공이 쉽지 않고 동일 사이즈에서 출력이 동기 릴럭턴스 전동기(Synchronous Reluctance Motor; SynRM)보다 낮기 때문에 현재 국내의 전동기 시장에서는 SynRM이 주목받고 있으며 현재 많은 연구가 진행되고 있다. 본 논문은 30kW급 팬 부하용 SynRM 설계에 관해 논문이다. 기존에 사용되었던 유도 전동기를 대체하기 위해 전동기의 자속장벽의 형상에 따라서 어떠한 효과가 있는지에 대해 연구하고 앞으로의 SynRM의 회전자 형상 설계 방법을 제시한다.

1. 서 론

SynRM은 동기 릴럭턴스 전동기로서 구동을 위한 VVVF(Variable Voltage Variable Frequency)의 벡터 인버터가 필수적이나 부하의 빈번한 속도 변동이나 크기변동 대응측면 등 여러 가지 측면에서 산업 동력용으로 적합하다. 또한 SynRM은 유도전동기와는 달리 구조적으로 회전자에 추가적인 다이캐스팅 작업이 불필요하고 급형으로 프레스 가공하여 적층하기 때문에 양산단가를 낮출 수 있다. 이러한 것은 회전자 형상의 릴럭턴스만을 이용하는 것이고 이것은 결국 돌극차에 의해 발생되므로 회전자의 형상 설계가 중요하다. 본 논문은 기존의 30kW급 팬 부하용 유도전동기를 더 적합한 SynRM으로 대체하기 위한 방안을 제시하여 유도전동기와 동일사이즈에서 회전자를 SynRM으로 설계함으로써 IE4급(슈퍼 프리미엄급) 효율을 만족시키기 위한 방안을 제시한다.

2. 본 론

2.1 기존 유도전동기의 스펙



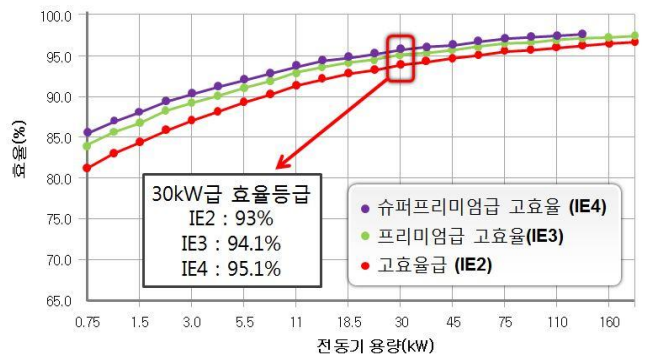
〈그림 1〉 기존 유도전동기 해석 모델

〈표 1〉 기존 유도전동기 해석모델 스펙

설계변수	size	단위
고정자 외경	298	mm
회전자의외경	191	mm
적층길이	250	mm
공극두께	0.65	mm
슬롯수	48	
턴수	30	turns
정격속도	1773	rpm

위의 그림1은 본 논문에서 타겟으로 잡은 기존 팬 부하용 30kW급 유도전동기의 해석모델이고 표1은 기존 30kW급 유도전동기의 해석결과이다

다. 유도전동기 모델의 효율은 93.04%의 효율로 고효율급 유도전동기에 속한다. 각 효율별 유도전동기의 등급은 아래의 그림2에 나타내었다.



〈그림2〉 30kW급 유도전동기의 효율 등급

2.2 설계이론

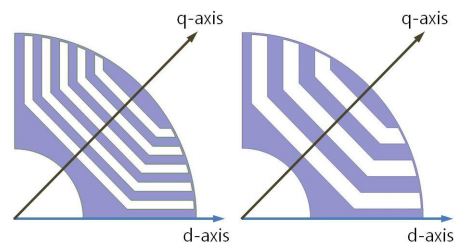
SynRM은 영구자석기기와는 달리 릴럭턴스 토크로만 회전하는 전동기이다. 영구자석을 사용하지 않기 때문에 회전자의 세그먼트(자속장벽과 자속장벽의 사이)와 자속장벽의 형상에 따라서 토크와 역률 특성이 다르다. 높은 출력밀도가 나오더라도 사용 장소에 따라서는 토크 리플 등이 크게 생길 수 있다. 토크 리플이 생기게 되면 소음이 발생되기 때문에 사용 장소에 따라서 형상설계 진행 한다.

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

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

L_d/L_q : 돌극비 $L_d - L_q$: 돌극차

위의 식은 SynRM의 토크와 역률 식이다. 식에서 보이는 바와 같이 돌극차와 돌극비를 증가시키면 토크와 역률의 특성이 달라지게 된다. 돌극비만을 위한 회전자의 형상설계가 진행 되면 회전자의 풍손 혹은 큰 토크리플로 인한 진동 및 소음 등의 단점에 의해 전동기의 성능을 저하시킬 수 있으므로 이점을 잘 고려하여 설계하여야 한다.



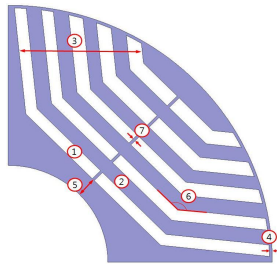
〈그림 3〉 자속장벽 형상에 따른 L_d 와 L_q 의 관계

그림3은 자속장벽과 세그먼트의 형상에 따라 d축 인덕턴스와 q축 인덕턴스가 어떻게 변화하는지를 보여주고 있다. 자속장벽의 수가 적으면 L_q 가 증가하고 식에서 보여지는바와 같이 토크가 감소하게 된다. 반대

로 자속장벽이 많아지면 L_q 가 감소하여 토크가 증가하지만 세그먼트가 얇아져 포화의 우려가 있고 토크 리플이 증가하게 된다. 또 고속 회전 시에는 비산의 위험이 있으므로 이점을 유의하여 형상설계를 진행해야 한다.

2.3 회전자 형상 설계

SynRM은 영구자석을 사용하지 않기 때문에 회전자의 형상구조가 중요하다. 높은 출력밀도를 얻기 위한 회전자의 자속장벽과 세그먼트의 위치와 두께를 조절하여 가장 높은 출력 밀도를 갖는 형상으로 설계를 한다. 그림2는 최적설계를 위한 회전자의 설계변수를 나타낸다.



〈그림 4〉 회전자 설계변수

〈표 2〉 회전자 설계 변수

설계변수	① 자속장벽 두께	② 세그먼트 두께
동일 설계변수	③ 자속장벽 개수(5고정)	④ 립(rib) 두께(1mm고정)
	⑤ 중심거리(7.5mm 고정)	⑥ 자속장벽 각도
	⑦ 브릿지 두께(1mm고정)	

그림4는 회전자 설계 시의 설계변수를 나타내고 표2은 각 설계변수의 설명이다. 본 논문은 기존의 유도전동기 대체용이므로 SynRM의 회전자 형상설계만을 고려한다. 각 형상은 고정설계변수와 유동설계변수로 나누어서 위치 형상에 따른 해석이 진행되었다.

기존의 유도전동기의 고정자는 슬롯 수가 48슬롯이었기 때문에 슬롯수는 기존 유도전동기와 동일하게 48슬롯 선정하였다. 자속장벽의 수는 일반적으로 많을수록 높은 출력밀도를 갖는다. 하지만 정격포인트에서 대전류 인가시에 포화상태와 강성에 관한 문제를 고려하여 자속장벽의 개수는 5가 가장 적절하다. 아래의 그림은 본 논문에서의 회전자 설계 수순을 나타내고 있다.



<Step1>

각각 5개의 자속장벽과 세그먼트의 변수를 설정하여 kW비(자속장벽과 세그먼트 사이의 비)가 1인 상태에서 변수를 조절하여 해석을 통해 최적형상을 찾는다.

〈표 3〉 자속장벽 두께

barrier1 [mm]	barrier2 [mm]	barrier3 [mm]	barrier4 [mm]	barrier5 [mm]
4.25	4.25	4.25	5.12	5.12



<Step2>

회전자의 강성을 보완하기 위한 브릿지를 설정한다. 단 브릿지가 너무 두꺼우면 누설 자속이 크게 생길 수 있기 때문에 포화되는 범위에서 적절한 두께로 선정한다.



<Step3>

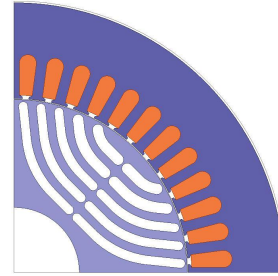
회전자의 강성과 매끄러운 자속패스를 만들어주기 위해 라운딩한다.

〈그림 5〉 회전자 형상 설계과정

자속장벽의 개수는 5개로 고정하였으나 각각의 자속장벽과 세그먼트

의 두께를 변수로 두고 해석하면 다른 해석 결과가 나올 수 있다. 그림 5에서 <Step1>은 먼저 각각의 자속장벽과 세그먼트의 비를 찾아 가장 높은 효율을 갖는 회전자의 형상이다. <Step2>는 고속 회전시에 회전자의 강성을 보완하기 위하여 브릿지를 주어 설계하였다. 브릿지를 주면 어느 정도의 누설자속이 생길 수 있다. 하지만 그 두께에 따라서 포화되면 결국 공기와 같게 되기 때문에 자속패스에 큰 영향을 미치지 않으면서 강성을 보완할 수 있다. 마지막으로 <Step3>은 각 자속장벽에 라운딩을 준 회전자의 형상 설계도면이다. 라운딩을 줌으로써 약간의 강성을 보완할 수 있고 또한 매끄러운 자속패스를 만들어 줄 수 있다. 아래의 그림 6은 최종적으로 설계된 SynRM의 1/4주기 모델을 나타낸다.

2.4 해석모델



〈그림 6〉 SynRM Model

설계변수	size	단위
고정자 외경	298	mm
회전자의경	191	mm
적층길이	250	mm
공극두께	0.65	mm
슬롯수	48	
턴수	15	turns
자속장벽	5	
정격속도	1800	RPM

〈그림 7〉 SynRM Model의 스킴

〈표 4〉 SynRM모델 해석결과

효율[%]	역률[%]	토크[Nm]	철손[W]	전류[A]	배타각[°]
95.87	71	163	400	43	56

〈표 5〉 기존 유도전동기 해석모델 결과

효율[%]	토크[Nm]	철손 [W]	2차동손 [W]	Irms[A]	EMFrms [V]
93.04	173.91	267.7	690	33.85	361.27

위의 그림6은 설계변수를 고려하여 설계한 1/4 주기 모델이다. 해석한 결과 위의 표 4와 같고 기존 유도전동기의 해석결과는 표5와 같다. 설계된 SynRM모델의 효율은 95.87%로써 기존 유도기 모델보다 약 2.8%이상의 효율을 상승시켰고 또한 IE4급 효율을 만족시킨다.

3. 결 론

본 논문은 기존의 30kW 유도전동기를 대체하기위한 SynRM설계시에 회전자 형상에 관한 논문이다. SynRM은 유도전동기와 같이 영구자석을 사용하지 않기 때문에 전동기 제작시에 가격이 저감된다는 장점이 있다. 하지만 유도전동기는 SunRM보다 구조가 복잡하기 때문에 SynRM보다는 가격이 비싸고 또 2차 동손이 발생되며 해석시간이 오래 걸리기 때문에 효율을 올리기가 어렵다는 단점이 있다. 본 논문에서는 기존의 30kW 유도전동기를 타겟으로 하여 SynRM의 회전자에서의 각각의 변수를 고려하여 해석을 통해 동일사이즈에서 슈퍼프리미엄급 효율을 만족시켰다.

[참 고 문 헌]

[1] 한양대학교 에너지변환 연구실, “전기기기” pp321~412, pp425~484, 2012
 [2] 김상훈, “DC, AC, BLDC 모터제어”, pp118~169페이지, 2012출판년도
 [3] 김원호, “동기형 릴럭턴스 전동기의 토크와 역률 특성 향상을 위한 최적 설계 연구”, 조명·전기설비학회 논문지, pp93~100, 2013.12