

5.5kW급 동기 릴럭턴스 전동기의 베리어 형상에 대한 출력 특성 분석

남용우*, 이재광*, 정동훈*, 이주*
한양대*

Analysis of Output Characteristics for the Barrier shape of a 5.5kW SynRM

Yongwoo Nam, Jae-Kwang Lee*, Dong-Hoon Jung*, Ju Lee*
Hanyang University*

Abstract - 동기 릴럭턴스 전동기는 회전자 d축 인덕턴스와 q축 인덕턴스의 차이를 이용하여 릴럭턴스 토크를 발생시키는 기기이다. 동기 릴럭턴스 전동기는 회전자 형상이 단순하고, 경제적이며 내구성이 강하여 점차 강화되는 최저 효율제에 대응하기 위해 유도 전동기의 대체 모델로 연구되고 있다. 본 논문에서는 5.5kW급 동기 릴럭턴스 전동기의 베리어 형상을 Bar type과 Arc type 2가지 모델로 분류하여 각각에 대해 출력 특성을 분석하고, 베리어 내 Ferrite 재질의 영구자석을 삽입 시, 기존 모델 대비 출력 특성 변화에 대한 분석을 진행하였다.

1. 서 론

국내 전기 에너지의 54%를 차지하는 전동기의 최저 효율 기준이 최근 전용량 대에 걸쳐 프리미엄급(IE3)으로 상향되었고, 향후 전동기에 대한 효율 규제가 강화되어, 슈퍼 프리미엄급(IE4) 이상으로 상향될 예정으로 전동기 효율 향상에 대한 연구가 활발히 이루어지고 있다. 현재 산업계 전반적으로 사용된 유도전동기는 구조가 간단하고 제작비용이 저렴하여 많이 사용되었지만, 회전자에 흐르는 2차 전류에 의해 일반 전동기 대비 2차 측의 추가 동손이 발생하므로 유도전동기 효율을 향상시키는 방법에 있어, 한계점에 다다르게 되었다. 동기 릴럭턴스 전동기는 회전자 형상이 단순하고 제작이 간편하며 신뢰성이 높아 유도 전동기의 대체 모델로 연구되고 있다. 본 논문에서는 동기 릴럭턴스 전동기(SynRM: Synchronous Reluctance Motor)와 회전자 베리어 내 Ferrite 재질의 영구자석을 소급 적용하는 영구자석 보조형 동기 릴럭턴스 전동기(PMa-SynRM: Permanent Magnet assisted Synchronous Reluctance Motor)의 출력 특성을 분석하여 슈퍼 프리미엄급(IE4) 목표인 92.4% 효율을 낼 수 있는 전동기에 대해 연구하고자 한다.

2. 본 론

2.1 비희토류 전동기 기술 개발

희토류 영구자석(Rare-Earth Magnet)을 이용한 영구자석 전동기는 효율이 높고 출력 밀도가 높은 장점을 지니고 있으나, 희토류 원자재 가격이 비싸고, 희토류 세계 공급량의 96%를 중국에서 담당하기 때문에, 가격 변동성이 심한 단점이 있다. 따라서 희토류 원자재 가격에 영향을 받지 않기 위해 비희토류 영구자석을 적용하거나 회전자의 구조를 변경시켜 영구자석을 사용하지 않는 비희토류 전동기에 대한 연구가 활발해지고 있다. 첫 번째는 비희토류 영구자석을 사용하는 방안으로, 높은 특성의 Ferrite 자석을 사용해 희토류 자석을 대체하는 기술로서, 대표 모델은 Spoke type PMSM이다. 회전자 코어 형상을 바퀴 형상으로 만든 후, 회전자 내부에 자석을 삽입하여 영구자석의 자속 집중을 통해 마그네틱 토크를 극대화하게 된다. 두 번째는 d축과 q축의 인덕턴스 차를 극대화한 회전자 형상 설계를 통해 릴럭턴스 토크를 이용하는 방안으로 동기 릴럭턴스 전동기(SynRM)와 Ferrite 자석 또는 비희토류 자석을 소급 적용한 영구자석 보조형 동기 릴럭턴스 전동기(PMa-SynRM)가 있다.

2.2 SynRM 및 PMa-SynRM 사양

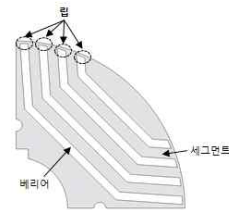
<표 2>은 동기 릴럭턴스 전동기(SynRM) 및 영구자석 보조형 동기 릴럭턴스 전동기(PMa-SynRM)의 사양을 나타낸다. 해당 전동기는 5.5kW급 유도전동기를 대체하기 위한 전동기이다. 정격 토크, 속도, 출력, 고정자의 외경 및 적층길이는 기존 유도전동기를 대체할 수 있게끔 동일하게 선정하였다. 전압제한치의 경우 산업용 3상 선간 전압 380Vrms에서 10% 마진을 적용하여 340Vrms로 가정하고, 전과정류 이후, SVPWM 제어를 사용하는 가장 하에 상전압 최대를 264Vmax로 선정하였다.

<표 1> 전동기 사양

항 목	값	단 위
정격 출력	5.5	kW
정격 토크@속도	29.2@1800	Nm@RPM
전압 제한치	264	V _{ph,max}
고정자 외경	228	mm
회전자 외경	141.1	mm
공극	0.45	mm
적층길이	120	mm

2.3 동기 릴럭턴스 전동기 회전자 구조

<그림 1>은 동기 릴럭턴스 전동기 회전자 구조로 베리어와 세그먼트, 립 구조로 되어 있다. Bar type 베리어 모델과 Arc type 베리어 모델의 특성을 비교하기 위해 Bar type과 Arc type 2가지 모델에 대해 립 구조, 베리어 개수 및 두께를 동일하게 선정하였다. 립 구조는 베리어와 세그먼트를 지지해 주는 구조로서 본 논문에서는 자속 누설로 인한 출력 저하 및 제작성을 고려하여 립 구조는 1.0mm로 선정하고, 베리어의 개수는 4개, 두께는 3.4mm로 선정하였다. 그림 1_a는 동기 릴럭턴스 전동기 회전자의 Bar type 베리어 모델이고, 그림 1_b는 동기 릴럭턴스 전동기 회전자의 Arc type 베리어 모델이다.



<그림 1> 동기 릴럭턴스 전동기 회전자 구조



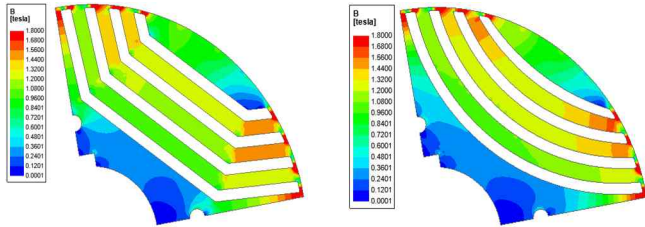
<그림 1_a> Bar type



<그림 1_b> Arc type

2.4 동기 릴럭턴스 전동기 출력 특성 분석

FEA(Finite Element Analysis)를 이용한 동기 릴럭턴스 전동기의 부하 해석을 통해 동기 릴럭턴스 전동기의 출력 특성 분석을 진행하였다. 그림 2_a는 동기 릴럭턴스 전동기 회전자 Bar type의 자속 포화 정도를 표현하였고, 그림 2_b는 동기 릴럭턴스 전동기 회전자 Arc type의 자속 포화 정도를 표현하였다. 표 2는 동기 릴럭턴스 전동기의 출력 특성 결과 값으로, 정격속도에서 전류 위상각을 조절하여 최대 효율이 발생하는 지점에서의 출력 특성을 분석하였다.



<그림 2_a> Bar type

<그림 2_b> Arc type

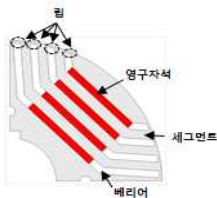
<표 2> 동기 릴럭턴스 전동기의 출력 특성

항 목	Bar type	Arc type	단 위
속도	1800	1800	RPM
토크	29.2	29.3	Nm
출력	5.51	5.53	kW
입력 전류	13.7	13.7	A_{rms}
전류 위상각	60	60	deg
Ld	71.3	71.5	mH
Lq	8.1	8.0	mH
효율	92.5	92.5	%

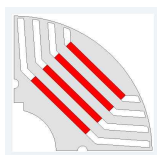
표 2에서 출력 특성을 확인한 결과, 베리어 형상에 따라 Ld 값과 Lq값의 차이가 변경되어 동일 입력 전류 및 동일 전류 위상각 인가시 Bar type 베리어 대비 Arc type 베리어의 출력이 0.4% 개선됨을 확인할 수 있었다.

2.5 영구자석 보조형 동기 릴럭턴스 전동기 회전자 구조

그림 3은 영구자석 보조형 동기 릴럭턴스 전동기 회전자 구조로 베리어 내 영구자석을 소급 적용하여 효율 특성을 개선한 구조이다. 그림 3_a는 영구자석 보조형 동기 릴럭턴스 전동기 회전자의 Bar type 베리어 모델이고, 그림 3_b는 영구자석 보조형 동기 릴럭턴스 전동기 회전자의 Arc type 베리어 모델이다. Bar type 모델과 Arc type 베리어 모델의 회전자 구조 형상이 달라서 영구자석의 형상이 다르지만, 영구 자석의 총 체적은 동등 수준으로 설계하였다.



<그림 3> 영구자석 보조형 동기 릴럭턴스 전동기 회전자 구조



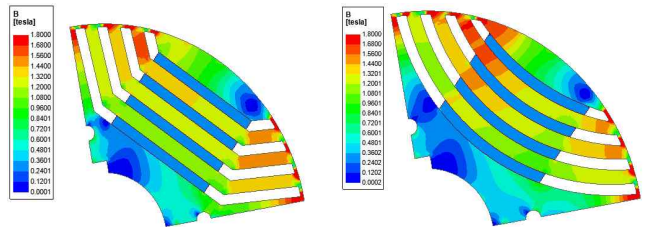
<그림 3_a> Bar type



<그림 3_b> Arc type

2.6 영구자석 보조형 동기 릴럭턴스 전동기 출력 특성 분석

FEA(Finite Element Analysis)를 이용한 영구자석 보조형 동기 릴럭턴스 전동기의 부하 해석을 통해 영구자석 보조형 동기 릴럭턴스 전동기의 출력 특성 분석을 진행하였다. 그림 4_a는 영구자석 보조형 동기 릴럭턴스 전동기 회전자 Bar type의 자속 포화 정도를 표현하였고, 그림 4_b는 영구자석 보조형 동기 릴럭턴스 전동기 회전자 Arc type의 자속 포화 정도를 표현하였다. 표 3은 영구자석 보조형 동기 릴럭턴스 전동기의 출력 특성 결과 값으로, 정격속도에서 전류 위상각을 조절하여 최대 효율이 발생하는 지점에서의 출력 특성을 분석하였다.



<그림 4_a> Bar type

<그림 4_b> Arc type

<표 3> 영구자석 보조형 동기 릴럭턴스 전동기의 출력 특성

항 목	Bar type	Arc type	단 위
속도	1800	1800	RPM
토크	29.2	29.3	Nm
출력	5.50	5.53	kW
입력 전류	11.8	11.8	A_{rms}
전류 위상각	55	55	deg
Ld	72.8	72.6	mH
Lq	6.0	5.4	mH
효율	93.2	93.3	%

표 3에서 출력 특성을 확인한 결과, 베리어 내 영구자석을 삽입할 경우 기존 동기 릴럭턴스 전동기 구조 대비 동일 입력 전류 인가 시, 효율이 0.7% 상승함을 확인할 수 있었고, Bar type 베리어 대비 Arc type 베리어의 출력이 0.6% 개선됨을 확인할 수 있었다.

3. 결 론

본 논문에서는 5.5kW급 동기 릴럭턴스 전동기의 베리어 형상 및 베리어 내 영구자석 삽입에 따른 출력 특성을 연구하였다. 회전자 베리어 형상을 Bar type과 Arc type으로 설정하고, FEA를 통한 출력 특성을 검토하였다. 동기 릴럭턴스 전동기의 2가지 모델에 대한 효율은 92.5%로서, 슈퍼 프리미엄 효율기준(IE4)인 92.4%를 상회하여 목표 효율을 만족하는 결과값을 확인할 수 있었다. 추가적으로, 베리어 내 영구자석을 소급 적용하여 동기 릴럭턴스 전동기의 회전자 베리어 형상과 동일한 구조에서의 출력 특성을 검토하였다. FEA를 통한 출력 특성 검토 결과, 동기 릴럭턴스 전동기 대비 0.7% 효율이 상승하여, 슈퍼 프리미엄급 효율 기준(IE4)보다 훨씬 높은 고효율용 영구자석 보조형 동기 릴럭턴스 전동기 설계를 도출하였다.

[참 고 문 헌]

- [1] 이재광, 정동훈, 최봉석, 김술, 이주, “반응표면법을 이용한 영구자석 동기형 릴럭턴스 전동기의 립 구조 개선에 관한 연구”, 대한전기학회 학술대회 논문집, 573-574, 2018
- [2] 정동훈, 설현수, 김술, 이주, “반응표면법을 이용한 슈퍼프리미엄급(IE4)급 이상의 초고효율 PMA-SynRM 설계”, 대한전기학회 학술대회 논문집, 679-680, 2017
- [3] 김원호, “동기형 릴럭턴스 전동기의 토크와 역률 최대화를 위한 회전자 설계 기법”, 조명·전기설비학회논문지, 93-100, 2013