

항공기 추진용 Ring-type PMSM 설계

이재광*, 이기덕*, 정재웅*, 이 주*
한양대학교*

Design of Ring type PMSM for aircraft propulsion system

Jae Kwang Lee*, Ki-Doek Lee*, Jae Woong Jung*, Ju Lee*
Hanyang University*

Abstract - 본 논문은 항공기 추진용 전동기에 대한 논문으로 전동기 내부에 블레이드가 삽입되는 특징으로 인해 매우 얇은 요크폭과 항공기 시스템 효율을 위해 가볍게 설계해야 한다는 점을 제약조건으로 갖는 Ring-type PMSM 설계에 관한 논문이다. 본 논문에 언급되는 전동기의 경우 내부에 삽입되는 블레이드로 인해 내부 요크 폭이 매우 얇다는 제약조건에서 어떠한 전동기 타입이 적절한지 검토하였고, 네오디움(NdFeB) 자석을 사용하여 높은 자속밀도로 고효율을 얻는 동시에 높은 도전율과 얇고 넓은 자석 형상에 따라 발생하는 손실을 저감하기 위한 설계를 진행하였고 유한요소해석을 통해 감자를 고려하여 전자기적 성능을 확인하였다.

1. 서 론

석유 자원의 고갈과 유가 상승, 그리고 탄소방출로 인한 환경오염 문제로 인해 실생활과 산업분야에 적용되어 있는 내연기관을 전동기로 교체하기 위해 연구소와 산업체에서 많은 연구가 진행되고 있다.

우리 실생활에서 쉽게 접할 수 있는 대표적인 예로 전기자동차를 들 수 있는데 이 뿐만 아니라 요즘 들어 항공기와 선박을 추진하는데 사용하는 내연기관 또한 전동기로 전환하고자 하는 연구가 활발히 진행되고 있다. 본 논문에서는 전동기 내부에 블레이드가 삽입되어 항공기 추진용으로 이용되는 전동기에 대해 연구하였다.

영구자석 전동기의 경우 크게 높은 자속밀도를 발생시키는 네오디움(NdFeB) 자석이 적용된 SPMSM(Surface Permanent Magnet Synchronous Motor)과 IPMSM(Interior Permanent Magnet Synchronous Motor) 전동기로 구분할 수 있다. 본 논문에서 다루는 항공추진용 Ring-type PMSM의 경우 전동기 내부에 블레이드가 삽입되어야 하기 때문에 회전자 외경의 요크 폭이 매우 얇아져 내부에 사용할 수 있는 자석의 형상과 크기도 제약이 따른다. 때문에 본 논문에서는 회전자 계열 영구자석이 적용된 SPMSM과 IPMSM에 자석의 형상과 삽입 방법에 따라 어떤 모델이 Ring-type PMSM에 적합한지에 대하여 검토하였다. 두가지 타입 중 SPMSM의 특징으로 크게 자석이 회전자표면에 부착되어 있는 구조로 제작이 간단하다는 점과 회전자가 회전할 때 자석 비산을 방지하기 위해 Sleeve를 설치해야 한다는 점을 갖고, IPMSM의 경우 자석이 내부에 매입되어 있어 Sleeve 설치가 불필요하고 Ld, Lq 차이를 두어 돌극성을 띄는 구조로 설계하게 된다면 마그네틱토크와 릴럭턴스 토크를 이용하여 고폭을 확보 할 수 있고 자석 단부에 누설 자속이 발생한다는 특징을 갖는다. 본 논문에서는 항공추진용 Ring-type PMSM를 두 가지 타입의 설계하여 유한요소해석을 통해 전자기적 성능을 비교하고 Sleeve에서 발생하는 손실과 자석에서 발생하는 손실을 분석하여 최종 모델을 선정하였다.

2. 본 론

2.1 항공추진용 Ring-type PMSM 적합 모델 검토

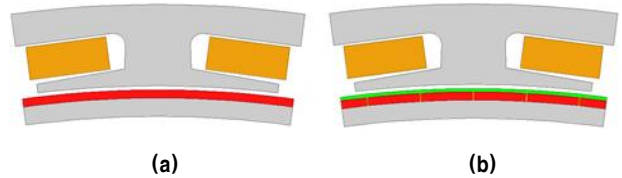
본 모델에서 설계한 모델의 극수 슬롯 수 조합의 경우 운전시에 발생하는 철심에서의 히스테리시스손과 얇은 요크폭으로 인해 회전자 내부에 삽입할 수 있는 자석의 제약조건, 그리고 제어성을 고려하여 몇 가지 조합을 선정 후 유한요소해석을 20극 24슬롯으로 선정하였다.

Ring-type 전동기의 경우 항공기 시스템에서 요구하는 추진력을 만족시키기 위해 내부에 충분한 크기의 블레이드가 삽입되어야 하고 시스템 효율을 위해 가능한 얇은 적층 길이로 요구 성능을 만족해야 한다는 특징을 갖는다. 이 같은 특징은 전동기 내부 요크의 폭을 제한하게 되고 포화를 피하기 위해 영구자석을 회전자의 구조적 특징을 고려하여 설계를 진행해야 한다. <표 1>에는 전동기의 제약조건과 목표 성능 등을 기입하였다.

<표 1> Ring-type PMSM 사양

구분	사양	구분	사양
고정자 외경[mm]	277.5	극수/슬롯수	20/24
회전자 외경[mm]	256.5	정격 속도[rpm]	6000
블레이드 외경[mm]	250	정격 출력[kW]	10.8
잔류자속밀도[T]	1.25	최고 속도[rpm]	8000
공극 길이[mm]	1	최고 출력[kW]	26

<표 1>의 조건들을 고려하여 정격 속도에 성능을 만족시키는 SPMSM에서 <그림 2-a>와 같이 원형자석이 적용된 모델과 <그림 2-b>와 같이 자석 분할 후 Sleeve를 적용한 모델을 검토하였다.



<그림 1> Ring-type SPMSM 기본 모델

<표 2> SPMSM 정격속도에서의 성능 비교

구분 \ Type		<그림 1-a>	<그림 1-b>
6000 [rpm]	전류[A]	240	240
	철손[W]	1050.3	856
	와전류손[W]	7236	5927.1
	출력[W]	10031.5	10585.3
	효율[%]	51.5	57.1
8000 [rpm]	전류[A]	300	300
	철손[W]	1805	1400
	와전류손[W]	13774	10783
	출력[W]	12920	15587
	효율[%]	42.2	52.2

<표 2>를 통해 (a) 모델에서는 영구자석 와전류손이 크게 발생하는 것을 볼 수 있다. 그 결과 정격속도에서는 낮은 효율로 만족하는 성능을 얻을 수 있는데 반해 최고속도에서는 영구자석 와전류손의 상승으로 만족하지 못하는 결과를 얻을 수 있었다. (b) 경우 (a)에서 발생한 문제인 마그넷 손실을 저감하기 위해 자석을 분할한 모델이다. <표 2>를 보면 정격속도에서는 자석에서 발생하는 손실은 줄어든데 반해 (a) 모델에는 없던 비산을 방지하기 위해 설치하였던 Sleeve에서 큰 손실이 발생하는 것을 확인할 수 있었고 두 모델을 검토한 결과 본 시스템에 적용하기 위해선 SPMSM의 경우 본 시스템에 부적절하다는 것을 알 수 있었다.

앞서 확인하였던 고속영역에서 만족하는 출력을 얻지 못하였던 SPMSM을 대체하기 위해 IPMSM를 설계하여 타당성을 검토하였고, IPMSM의 경우 원형 자석을 사용한 SPMSM에서와 동일하게 내부에 얇고 넓은 자석을 삽입하였을 때 자석에서 큰 와전류손이 발생하는 것을 확인할 수 있었고 앞선 내용과 마찬가지로 자석을 저감해가면서 그 영향성과 제작성을 고려하여 적합한 포인트를 선정하였다.

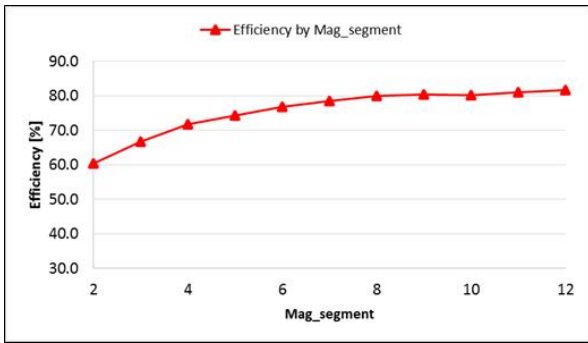
2.2 자석 분할을 통한 Ring-type IPMSM 마그넷 손실 저감

일반적으로 철손 P_t 의 경우 히스테리시스손(hysteresis loss) P_h 과 와전류손(eddy current loss) P_e 로 분류된다.

$$P_t = P_h + P_e = k_h f B^n + k_e f^2 B^2 \quad (1)$$

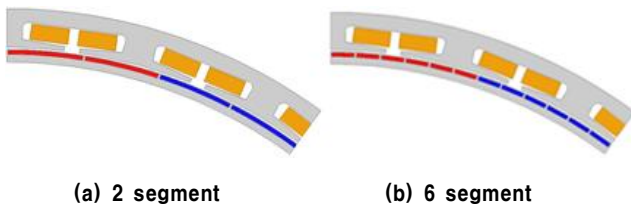
$$k_e = \frac{\pi c^2 \sigma}{6} \quad (2)$$

여기서 f 는 입력전류의 주파수, B 는 입력전류에 의한 철심의 자속밀도, k_h 와 k_e 는 각각 히스테리시스 손실 계수와 와전류 손실 계수이고 c 는 자석의 너비, σ 는 자석의 도전율을 나타낸다. 본 모델에 적용된 네오디움 자석의 경우 높은 잔류자속밀도로 고효율을 얻을 수 있다는 특징과 높은 도전율로 고속영역에서 운전될 때 상당한 와전류손이 발생하는 특징을 갖는다. 네오디움 자석이 적용된 전동기의 경우 자석에서 발생하는 와전류손을 고려해야 할 필요가 있다. 본 모델에서는 자석에서 발생하는 와전류손을 저감하기 위해 식 (2)에서 변경할 수 있는 자석의 너비를 자석 분할을 통해 조절하여 와전류손을 저감하는 설계를 진행하였다.



<그림 2> Magnet segment에 따른 효율 특성

<그림 2>는 자석에서 발생하는 와전류손을 줄이기 위해 정격 속도에서 자석을 분할을 통해 효율 추이를 분석한 그래프이다. 본 논문에서의 전동기는 내부에 블레이드가 삽입되는 이유로 내측 요크의 폭이 매우 얇기 때문에 설정한 극수 슬롯 수 조합에서 단일 bar-type 자석을 삽입할 만한 구조가 확보되지 않는다. 때문에 자석 분할에 의한 효율 추이를 분석하기 위해 <그림 3>에서와 같이 링 모양의 자석을 동일 간격으로 분할하여 배치했을 때의 변화하는 추이를 분석하였다.



<그림 3> Magnet segment가 적용된 Ring-type IPMSM

<그림 2>를 보면 자석의 분할 개수를 증가시키면 와전류손 저감으로 인해 전동기에 전체 효율이 높아지는 것을 확인할 수 있고 전동기의 제작성을 고려하여 6개로 분할하였을 때를 설계 포인트를 선정하였다.

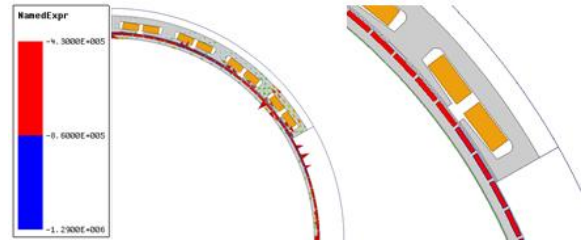
<표 2> IPMSM 자석 분할에 따른 정격속도에서의 성능 비교

구분	Type	<그림 3-a>	<그림 3-b>
전류[A]		210	170
철손[W]		1074	1083
와전류손[W]		3952	945
출력[W]		10216,7	10425
효율[%]		62.7	78.0

<그림 3>에 (a)의 경우 정격영역에서는 만족하는 성능을 얻을 수 있으나 고속영역에서 손실이 증가하여 목표 출력을 얻을 수 없는 것을 확인하였고 선정된 분할 개수로 설계하였을 때 (b)에서와 같이 모든 부하 포인트에서 목표 출력을 얻을 수 있었다.

2.3 감자 특성을 고려한 Ring-type IPMSM 신뢰성 검토

본 모델에 사용된 네오디움 자석의 경우 상온에 운전영역에서는 knee-point가 3사분면에 위치하는데 고속영역에 진입하게 되면 높은 주파수와 큰 전류가 인가되어 전동기 전체에 온도가 상승하고 마찰손과 같은 기계손에 의한 열과 더해져 높은 발열이 생성되게 된다. 발열이 심해지게 되면 네오디움 자석의 경우 knee-point가 2사분면으로 이동하게 되고 이를 고려하지 않고 운전하게 되면 역자계에 의해 운전점이 이동하여 영구적인 감자로 인해 전체 성능을 저하할 수 있다. 때문에 최대속도에서 만족하는 성능을 내는 전류 포인트와 사고를 가정한 두 배의 전류를 인가했을 때의 감자특성을 분석하였다.

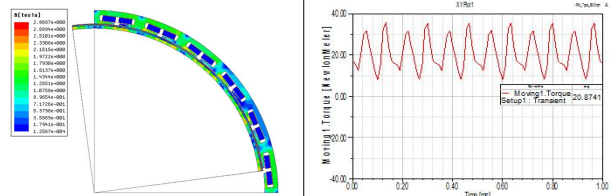


<그림 4> Ring-type IPMSM 감자 해석

앞선 가정으로 감자의 여부를 확인하고자 해석을 수행한 결과 <그림 4>를 통해 자석의 끝단에 무시해도 될 정도의 작은 감자가 일어난 것을 확인할 수 있었고, 최고 성능 포인트와 그 두 배의 전류 포인트에서도 감자가 일어나지 않는다는 것을 확인하였다.

<표 3> Ring-type PMSM의 최종모델과 사양

항목	값	항목	값
정격 전류[A]	170	최대 전류[A]	340
정격 속도[rpm]	6000	최대 속도[rpm]	8000
정격 토크[Nm]	16.6	최대 토크[Nm]	31.4
효율[%]	78	효율[%]	76.9



<최대토크일 때 자속밀도>

<정격속도일 때 토크>

3. 결 론

항공기 추진용 Ring-type PMSM의 경우 내부에 삽입되는 블레이드에 영향을 회전자의 요크 폭을 얇게 설계해야 한다는 제약조건을 고려해야 한다. 본 논문에서는 항공기 추진용 Ring-type PMSM의 적합한 타입을 선정하여 기초 설계를 진행하였고, 제약 조건에 의해 얇고 넓게 삽입되는 자석에 발생하는 와전류손을 자석을 분할하는 방법을 통해 저감하였다. 그 결과 전체 부하 포인트에서 만족하는 전동기를 설계하였고 정격 전류 그리고 두 배의 전류 포인트에서 감자해석을 통해 신뢰성을 확인하였다.

[참 고 문 헌]

[1] 안지훈, “초고속 영구자석 동기전동기의 슬롯 형상에 따른 철손 해석”, 대한전기학회 추계학술대회 논문집, 178-180, 2011. 10
 [2] 오세영, “집중권 IPMSM의 영구자석 와전류손 저감을 위한 회전자형상 설계”, 대한전기학회 학술대회 논문집, 498-499, 2012. 07
 [3] K. Yamazaki, Y. Fukushima, and M. Sato, “Loss analysis of permanent magnet motors with concentrated windings—Variation of magnet eddy current loss due to stator and rotor shapes,” IEEE Trans. Ind. Appl., vol. 45, no. 4, pp. 1334 - E1342, Jul./Aug. 2009.