2015년도 대한전기학회 하계학술대회 논문집 2015. 7. 15 - 17

고속 BLDC 전동기의 전자기 특성 해석

박형일*, 장석명*,**, 최장영*
충남대*, 셈스하이테크엔지니어링**

Electromagnetic Characteristics Analysis of High-speed Brushless DC Motor

Hyung-Il Park*, Seok-Myeong Jang*,**, Jang-Young Choi*
Chungnam National University*, SEMS Hightech Engineering**

Abstract - This paper deals with electromagneitc characteristics analysis of high-speed brushless DC motor. First, under same rated and restricted conditions, four models which have different slot combinations each other are designed using 2-d finite element (FE) analyses. Designed models are analyzed and compared in terms of core loss, copper loss, eddy-current loss, etc. On the basis of analysis results, it is found that the motor with a 2-pole PM rotor and a 6-slot stator has most outstanding performances in electromagnetic aspects.

1. 서 론

초고속 구동용 모터는 동일 출력의 범용 모터에 비하여 자성체의 체적이 매우 작아지므로 소형, 경량화가 가능하다. 따라서 공작기계의 스핀들 구동용, 또는 터보 압축 펌프나 마이크로 터빈과 같은 시스템에 필수적인 요소 기술이라 할 수 있다. 그런데 초고속 모터는 동일 출력의 범용 모터에 비하여 극소형화되기 때문에, 모터에서 발생하는 열을 최소화하고, 회전자가 원심력에 충분히 견디도록 구조가 간단하여 견고해야 하는 것이 필수조건이다[1].

최근 희토류계 영구자석의 발달로, 구조가 간단하고, 컴팩트한 NdFeB 영구자석을 회전자계로 하는 BLDC 기기가 수십만 rpm 까지의 초고속화에 가장 적합한 것으로 평가되고 있다. 영구자석형 전동기의 경우 고정자에만 권선이 배치되어 있어, 고정자와 회전자가 동시에 발열하는 유도 전동기에 비해 냉각을 단순화 할 수 있고, 고밀도 영구자석의 사용으로, 작은 체적으로 높은 출력을 낼 수 있다는 큰 장점을 갖는다[2].

일반적으로 전기기기의 열원은 전기적 손실에 의한 것으로 동손과 철손이 대표적이다. 동손은 전류에 의한 저항손에 해당되며, 철손은 재질 자체의 자기 이력 특성으로 인한 히스테리시스손과 유도 전류로 인한 손실인 와전류손으로 나눌 수가 있다. 또한, 공극 자속밀도의 비 정현적인 분포에 의한 회전자의 슬리브와 영구자석에서 발생하는 와전류손과 기계적 손실로 존재하는 베어링 마찰손과 풍손으로 분류할 수 있다. 전기기기에 있어 손실은 기기의 운전 조건이나 효율 등을 결정하는 중요한 요소이기 때문에 손실을 정확하게 예측하여 설계하는 것이 매우 중요하다[3].

본 논문에서는 고속 BLDC 전동기의 전자기 특성 해석을 다룬다. 2극 6슬롯, 12슬롯, 18슬롯, 24슬롯을 갖는 모델을 초기 모델로 설정하고 전자기 특성 해석을 진행하였다. 가 설계된 초기 모델의 동손, 철손, 와전류손 등 전자기 손실 특성 및 제작성을 고려하여 최종 모델을 결정하였다. 특히, 슬롯 면적 변경을 통해 고 효율화 설계를 진행하였고 고속기의 손실 저감 방법에 대해 설명하였다.

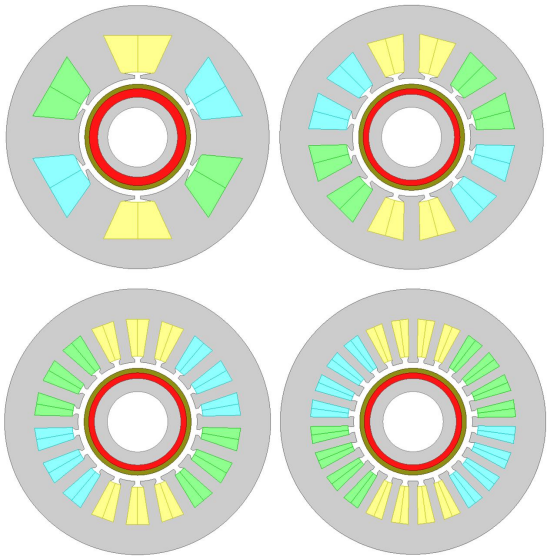
2. 본 론

2.1 해석 모델

표 1은 해석 모델의 정격 및 제한 사양을 보여준다. 본 논문에서 다루는 전동기는 정격 450W, 30000 RPM 2극 전동기로 작은 출력에도 불구하고 속도가 높기 때문에 회전자의 영구자석은 고속 회전시의 이탈이나 파편의 비산을 방지하고자 슬리브로 감싸고 있는 형태를 갖는다. 그림1은 4가지의 슬롯 조합을 갖는 해석 모델을 나타낸다. 2극 분포권 기기 중 일반적으로 많이 사용하는 6슬롯, 12슬롯, 18슬롯, 24슬롯 모델을 해석 모델로 결정하고 전자기 특성해석을 진행하였다.

2.2 가 설계 결과

표 2는 해석 모델의 가 설계 결과를 나타낸다. 전압과 부하토크, 점적률이 동일한 상태에서 해석되었으며 전체적인 전자기 특성은 비슷하나, 슬롯수가 많아질수록 와전류손이 증가하고 철손이 작아지는 특성을 보인다. 여기서 철손은 대부분 고정자에서 발생하는 손실이며 와전류손은 회전자의 영구자석 및 슬리브에서 발생하는 손실이다.



<그림 1> 해석 모델 : 2극 6 / 12 / 18 / 24 슬롯

<표 1> 정격 및 제한 사양

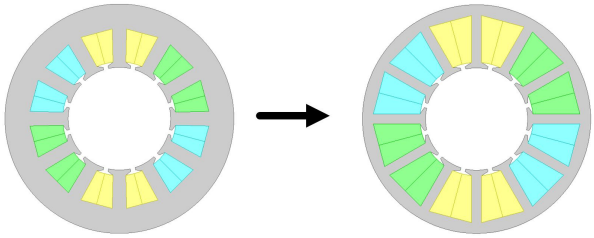
항 목	사양 및 단위	항 목	사양 및 단위
정격 출력	450 W	외경	100 mm
정격 토크	0.143 Nm	축방향 길이	35 mm
정격 효율	85 % 이상	구동 방식	BLDC 구동
정격 속도	30000 RPM	회전자 재질	SUS420J2
고정자 재질	20PNF1500	슬리브 재질	Inconel 718
정격 전압	13.5 V	냉각 방식	공냉식

<표 2> 해석 모델의 가 설계 결과

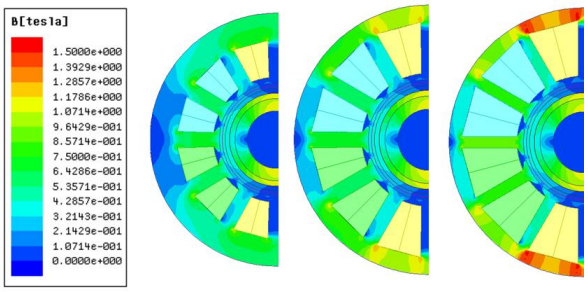
항 목	6슬롯	12슬롯	18슬롯	24슬롯
출력 (W)	418	451	456	462
토크 (mNm)	143	143	143	143
코깅토크 (uNm)	570	200	890	21
전류 (A)	29	31	30	31
속도 (RPM)	28029	29984	30454	30752
철손 (W)	17	14.6	13.9	13.9
동손 (W)	3.1	3.5	3.4	3.8
와전류손 (W)	7.1	11.6	11.6	12.47
효율 %	93.88	93.79	94.03	93.53

2.3 고 효율화 설계

그림 1의 해석 모델은 전류밀도가 약 $2A/mm^2$로 공기 냉각 방식을



<그림 2> 슬롯 면적 변경 개념도



(a) (b) (c)

<그림 3> 슬롯 면적 변경에 따른 자속밀도 분포

<표 3> 그림 3의 2극 12슬롯 해석 모델에 대한 슬롯 면적 변경에 따른 해석 결과

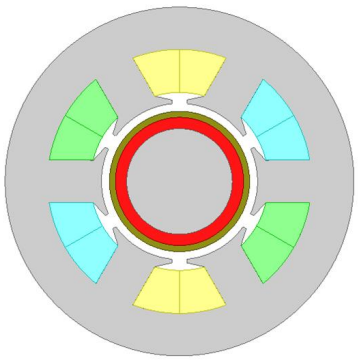
항 목	(a)	(b)	(c)
출력 (W)	433	458	633
토크 (Nm)	137	145	201
코깅토크 (uNm)	201	308	284
전류 (A)	29	31	43
속도 (RPM)	30000	30000	30000
철손 (W)	14	23	30
동손 (W)	4.4	3.6	5.9
와전류손 (W)	11	12.4	18.4
효율 %	93.5	92.2	92.1

고려하였을 때 여유가 있다. 따라서 그림 2와 같이 슬롯 면적의 변경을 통해 고 효율화 설계를 진행하였다. 표 3은 그림 3의 해석 모델에 대한 해석 결과이다. 전류밀도와 동손이 낮기 때문에 슬롯 면적이 바뀌어도 동손은 크게 변하지 않으나 슬롯 면적이 커질수록, 즉 치가 얇아질수록 치자속밀도가 증가하여 철손과 와전류손이 증가하는 것을 볼 수 있다. 또한 전자기 효율은 슬롯 면적이 작아질수록 증가하게 된다. 또한, 일반적으로 손실의 총 합이 동일한 경우 회전자의 손실을 줄이는 방법이 냉각 측면에서 유리하기 때문에 본 논문에서는 슬롯 면적을 줄이는 방법으로 해석 모델의 전자기 효율을 개선시켰다.

회전자에 발생하는 와전류손은 공극 자속밀도의 공간고조파와 시간고조파에 의해 발생한다. 여기서 공간고조파는 슬롯오프닝이 커질수록 커지고, 시간고조파는 고정자 권선 전류가 커질수록 커지게 된다. 따라서 슬롯오프닝은 최소 조건인 2mm로 하여 회전자에 발생하는 와전류손을 최소화 하였다.

2.4 최종 모델

전자기 해석 결과는 모든 모델에 대한 성능이 비슷하나, 제작성을 고려하였을 때 슬롯수가 많아질수록 무효슬롯면적이 커지기 때문에 24 슬롯 모델의 경우 제작이 어렵다고 판단되어 제외하였다[4]. 또한 18슬롯 모델의 경우 병렬회로를 사용해야 하는데, 기전력의 위상차에 의한 내부 순환 전류가 발생할 수 있기 때문에 제외하였다. 따라서 6슬롯 모델과 12슬롯 모델의 경우 전체적인 성능은 비슷하나 회전자 손실이 작고 구조적으로 간단한 6슬롯 모델을 최종 모델로 결정하였다. 표 4는 최종 모델에 대한 해석 결과이다.



<그림 4> 최종 모델

<표 4> 최종 모델에 대한 해석 결과

항 목	사양 및 단위	항 목	사양 및 단위
무부하 역기전력	5 Vrms 7.1 Vpeak	부하 시 역기전력	5.44 Vrms 8.83 Vpeak
코깅 토크	390 uNm	구동 토크	143 mNm
토크 리플	63 mNm	속도	31169 RPM
DC 전류	37.57 A	상 전류	31. 6Arms
동손	6.7 W	철손	15.84 W
와전류손	5.9 W	전자기 효율	94.3 %

3. 결 론

본 논문은 고속 BLDC 전동기의 전자기 특성 해석을 다루었다. 2극 6슬롯, 12슬롯, 18슬롯, 24슬롯을 갖는 모델을 초기 모델로 설정하고 전자기 특성 해석을 진행하였다. 가 설계된 초기 모델의 동손, 철손, 와전류손 등 전자기 손실 특성 및 제작성을 고려하여 최종 모델을 결정하였다. 특히, 슬롯 면적 변경을 통해 고 효율화 설계를 진행하였다. 비록 동역학 해석이 완료된 회전자를 적용하였고 기기의 정격 운전점에 비해 기기의 체적이 크기 때문에 특성 해석 범위의 한계가 있었지만 고속기의 손실 발생 원인과 손실 저감 방법을 다룸으로써 향후 고속기의 설계에 유용할 것이라 사료된다.

[참 고 문 헌]

[1] 장석명, 서진호, 정상섭, 최상규, “영구자석 Halbach 배열을 이용한 초고속 모터용 계자시스템의 구성과 특성 해석”, 전기학회논문지, vol. 48 ,no. 4, pp. 152-160, 1999.

[2] 장석명, 조한욱, 최장영, 최상규, 정연호, “터보 압축기용 초고속 브러시리스 DC 전동기의 설계”, 전기학회논문지, vol. 54, no. 6, pp. 278-286, 2005.

[3] 장석명, 조한욱, 이성호, 양현섭, “초고속 영구자석형 동기 전동기의 회전자 손실 특성해석”, 전기학회논문지, vol. 53, no. 3, pp. 143-151, 2004.

[4] 박형일, 장석명, 최장영, “외전형 BLDC 전동기의 특성 해석”, 대한전기학회 전기기기 및 에너지변환시스템부문회 춘계학술대회 논문집, 2015.