

슬롯 유무에 따른 초고속 마이크로 터빈용 영구자석 전동발전기의 손실해석 및 비교

조창흠*, 이 건*, 조유희*, 홍도관**, 우병철**
 동아대학교 전기공학과*, 한국전기연구원**

Comparison on Electromagnetic Losses of Permanent Magnet Synchronous Motor/Generator according to slotted and slotless for High-speed Micro Turbine

Chang-Hum Jo*, Li Jian*, Yun-Hyun Cho*, Do-Kwan Hong** Byung-Chul Woo**
 Dong-A University*, Korea Electrotechnology Research Institute Electric Motor Research Center**

Abstract - This paper deals with comparison on Electromagnetic losses of slotted and slotless high-speed PM Machine for Micro Turbine. Losses are consist of core losses, copper losses and eddy current losses. We are using both analytical method and 2D Finite Element Method for more detailed losses analysis. And then We compare Electromagnetic losses of slotted and slotless PM synchronous machine. This machine has designed of a generator of 800W, 40000rpm and a starter of 400W, 200000rpm.

1. 서 론

초고속 영구자석 회전기는 전동기 회전자에 영구자석을 포함하고 있으며 전동기의 속도 가감속과 전기에너지를 얻기 위해 전력변환장치와 구동드라이브기술이 필요하며 기존의 전동발전기보다 소형, 경량, 고출력, 고효율의 성능을 얻을 수 있고 이러한 요소 기술로서 고속전동기의 전자계 시스템 설계, 착자 기술, 열 해석 기술, 전동발전기의 방열 설계, 소음진동 설계, 전력변환기술과 제어기술을 포함한 메카트로닉스 기술을 집적화하고 있다.

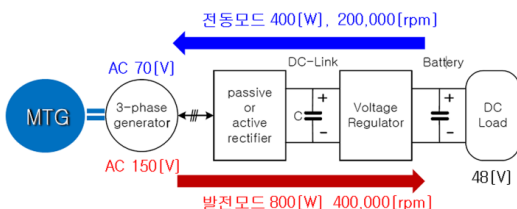
마이크로 터빈은 수만 rpm의 고속 원동기로서 일반적으로는 영구자석 동기발전기를 채용하여 발전하게 된다. 마이크로 전동발전기의 구동 방법은 기동 시에는 동기전동기로 운전하여 터빈을 일정속도에 도달할 때까지 가속하는 역할도 하게 된다.

본 논문에서 최종 개발하고자하는 분야는 전동 시 400W, 200krpm이고, 발전용량 800W, 400krpm급의 초소형 마이크로 터빈 전동발전기이다. 개발 및 제작에 앞서 초고속 회전 시에 두드러지게 나타나는 와전류 손실을 줄이기 위해서 파라미터를 분석하고 비교 검토하였다. 이에 공극 자속밀도의 정현적인 분포를 만들으로써 와전류 손실의 원인을 제거하는 방법으로 슬롯리스 모델을 제안하고 기존의 슬롯을 가지는 고정자 모델과의 손실비교를 하였다. 그리고 정확한 손실해석을 위하여 이차원 유한요소법을 이용하였다. [1]-[3]

2. 슬롯 유무에 따른 초고속 전동발전기의 손실 비교

2.1 전동발전기의 구성

고속전동발전기의 기본 설계사양으로는 영구자석의 감자조건, 장하분배법과 퍼미언스법을 이용하여 설계조건을 만족하는 기본 치수를 결정하였으며, 전압방정식에 의해 특성을 분석 및 검토하여 최종 결정하였다. 그림 1은 본 전동발전기의 시스템 구성을 나타낸다. 전력변환부 설계를 위하여 구동용 드라이버 개발도 진행하고 있으며 Sieb & Meyer의 상용 드라이버를 적용하여 전동기의 성능평가를 수행하고자 한다.

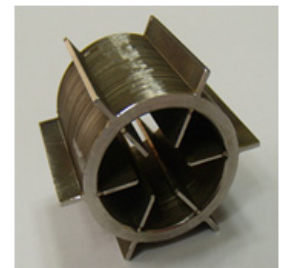
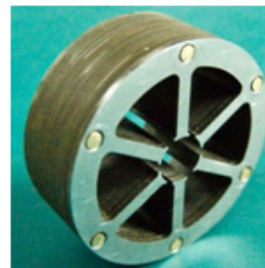


〈그림 1〉 전동발전기 시스템의 구성

표 1은 고속전동발전기의 제원을 명시하고 있다. 표 1의 제원에 근거하여 그림 2와 같은 두 고정자 구조의 손실을 2차원 유한요소법으로 구할 수 있었다.

〈표 1〉 Design Specification

Design Factor		Slotted	Slotless	
Rotor	Sleeve	Number of Pole	2	2
		Outer Diameter	8[mm]	8[mm]
		Inner Diameter	6.4[mm]	6.4[mm]
		Length	15[mm]	27[mm]
	PM	Material	Inconel	Inconel
		Br	1.061[T]	1.23[T]
	Outer Diameter	6.4[mm]	6.4[mm]	
Stator	Number of slot	6	6	
	Outer Diameter	44[mm]	28.3[mm]	
	Inner Diameter	34.4[mm]	23.3[mm]	
	Stack Length	15[mm]	27[mm]	
	Material	2605SA1	S18	
	Coil	Conductors per slot	40	41
		Diameter	0.16*15	0.16*28
		Fill Factor	34.1[%]	51.2[%]
Current density		6.96	7.6	



(a) Slotted (b) Slotless
 〈그림 2〉 슬롯유무에 따른 초고속 전동발전기의 고정자 형태

2.2 슬롯 유무에 따른 손실 해석 결과

고속전동기에서 출력의 손실은 고정자 코어의 철손, 권선의 동손, 영구자석과 슬리브에서 발생하는 와류손 및 베어링부에서 발생하는 기계손과 풍손으로 분류할 수 있다. 본 논문에서는 고정자 부분에서 발생하는 철손을 고려하여 슬롯 유무에 따른 두 가지 모델의 손실 해석을 수행하였다. 그리고 고정자 슬롯 유무에 따른 전자기적 손실을 이론적 방법을 바탕으로 2차원 유한요소법을 이용하여 계산하였으며 최종적으로 두 가지 모델의 손실을 비교 검토하였다.

2.2.1 Stator Losses

고정자 손실은 코어 손실과 동손으로 나눌 수 있다. 적층 코어에서 발생하는 코어 손실은 아래의 식 1의 Steinmetz 방정식을 이용하여 계산할 수 있으며, 고정자의 동손은 식 2로 계산 된다.

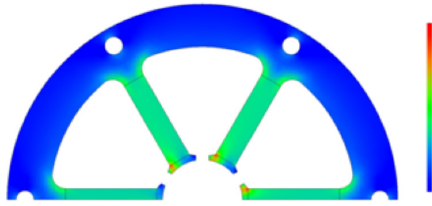
$$P_{core} = P_h + P_e + P_a \tag{1}$$

$$= K_h f B_m^n + K_e f^2 B_m^2 + K_\sigma f^{1.5} B_m^{1.5}$$

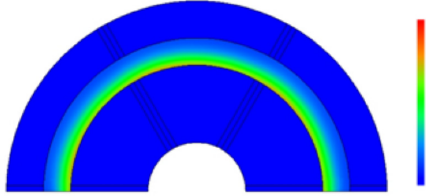
$$P_c = 3 \times I_{rms}^2 \times R_s \tag{2}$$

여기서, P_h , P_e 와 P_a 은 히스테리시스손, 와전류손을 나타낸다. 각

손실 계수와 주파수 및 자속밀도의 함수에 따라 손실은 비례하여 증가하게 된다. 아래의 그림 3 및 그림 4에서는 슬롯 유무에 따른 초고속 전동발전기의 철손 분포를 보여준다.



<그림 3> 슬롯타입 모델의 철손 분포



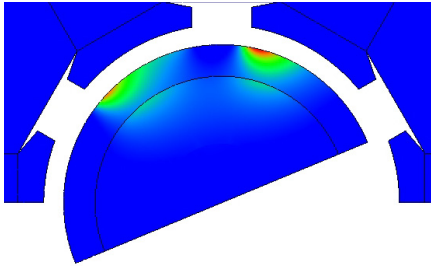
<그림 4> 슬롯리스타입 모델의 철손 분포

2.2.2 Rotor Losses

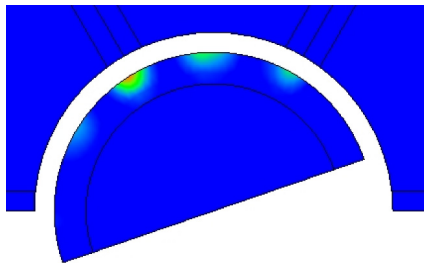
회전자의 손실은 영구자석과 도전성을 지닌 슬리브에서 유도되는 와전류손에 의하여 발생한다. 회전자 손실은 고정자 손실에 비교하여 작은 양에도 불구하고 로터로부터 발생하는 열을 방사하기 어렵기 때문에 회전자가 가열하게 된다. 또한 이러한 열은 자석에 부분적인 감자로 이어지므로, 가급적으로 손실을 줄이는 방향으로 회전자 설계를 하여야 한다. 와전류손은 식 3의 Poynting 이론을 이용하여 계산할 수 있다.

$$P_{eddy} = Re \{ [E_z]_{y=R_q} \times [H_x^*]_{y=R_q} \} / 2 \quad (3)$$

여기서, E_z 는 축방향으로 전기장의 크기를 나타내며, H_x 는 접선방향 자기장 세기의 공액복소수를 나타낸다. R_q 는 슬리브의 외경을 나타낸다. 아래의 그림 5 및 그림 6에서는 슬롯 유무에 따른 초고속 전동발전기의 와전류손 분포를 보여준다.



<그림 5> 슬롯타입 모델의 와전류손 분포



<그림 6> 슬롯리스타입 모델의 와전류손 분포

2.2.3 손실 비교 및 특성 결과

앞서 논하였던 고정자와 회전자의 손실 이론 및 해석 결과를 통하여 최종 특성결과를 표 2에서 보여준다. 해석결과를 확인하여 보면 슬롯리스 모델의 와전류손 저감효과를 확인할 수 있었으나, 고정자 철손의 증가로 인하여 비슷한 효율이 발생함을 확인할 수 있었다. 이와 같이 슬롯

유무에 따라 철손 저감의 효과가 나타나지 않는 이유는 일정 단면적 이하에서는 철손저감의 효과가 줄어들는 것으로 판단되며, 고정자 외경 및 내경의 최적설계가 필요함이 사료된다.

<표 2> 슬롯 유무에 따른 손실 비교

Characteristic/ Type		Slotted	Slotless
전압 [V]		113.908	111.2
전류 [A]		4.11	4.278
전기 손실	동손 [W]	7.98	7.192
	PM손 [W]	0.261	0.0006
	Can손 [W]	3.43	0.0036
	철손 [W]	27.194	35.4
	합계 [W]	38.865	42.6
입력 [W]		849.7	866.56
출력 [W]		810.9	823.96
효율 [%]		95.426	95.08

3. 결 론

본 논문의 최종개발 모델인 초고속 마이크로 터빈용 영구자석 전동발전기의 출력특성으로는 전동 시 400W, 200krpm이고, 발전 시 800W, 400krpm이다. 초고속 구동 시에 두드러지게 발생하는 와전류손을 저감하기 위하여 슬롯리스 형태의 고정자 구조를 고려하여 보았으며, 이에 고정자에 슬롯이 있는 모델과 슬롯이 없는 모델의 손실을 2차원 유한요소법을 사용하여 비교하여 보았다. 해석 결과를 통하여 슬롯리스 모델의 와전류손 저감효과를 확인할 수 있었으나, 고정자 철손의 증가로 인하여 비슷한 효율이 발생함을 알 수 있었다. 따라서 본 논문은 초고속 전동발전기의 설계와 응용에 기초 자료로 사용될 수 있을 것이며, 최적화된 성능을 요구하는 마이크로 터빈용 전동발전기 설계에 적용됨으로써 다양한 환경과 용도에 알맞은 최적 설계가 가능해 질것으로 사료된다. 그리고 해석결과는 현재 제작되고 있는 시제품과의 실험결과 비교함으로써 차후에 타당성을 검증하도록 하겠다.

본 논문은 방위사업청 및 국방과학연구소 지원으로 수행되는 차세대 군용전원특화연구센터 사업의 일환으로 수행되었습니다.

[참 고 문 헌]

- [1] Kyoung-Jin Ko, Seok-Myeong Jang, Jang-Young Choi, Sung-Ho Lee, Sang-Chul Han, Yong-BokLee, A core loss calculation based on magnetic field analysis considering the time harmonics of high-speed permanent magnet machine according to driving method, Electrical Machines and Systems, pp 1143 - 1146 , 2010
- [2] Seok-Myeong Jang, Ji-Hwan Choi, Kyoung-Jin Ko, Dae-Joon You, Jeong-Phil Lee, Characteristic analysis of slotless synchronous motor/generator with Halbach array PM for 30kW flywheel energy storage system, Electrical Machines and Systems, pp 1197, 2010
- [3] C.Zwysing and J.W.Kolar, Design of a 100W, 500000 rpm Permanent-Magnet Generator for Mesoscale Gas Turbines, Industry Applications Conference, Vol 1, pp 253-260, 2005