

110kW급 고출력 밀도형 PMSM의 손실 저감을 통한 고효율 설계에 대한 연구

Study on the High Efficiency Design through the Loss Reduction of the 110kW Class High-output Density PMSM

전 현 우* · 박 응 석* · 이 주* · 이 형 우*
(Hyun-Woo Jun · Eung-Seok Park · Ju Lee · Hyung-Woo Lee)

Abstract – In this paper, 110kW high output density, high efficiency Permanent Magnet Synchronous Motor which can be applied on tram's traction system is introduced, along with its output and loss characteristics. The motor model is 2pole 18slot model and its size has been reduced through the high speed for high output density. Especially, structure and retainer sleeve structure is applied to its structure, which is also appropriate for high speed rotation. This kind of structure has eddy current loss problem on the surface of rotor, which must be reduced for high output density design. This study has designed the most optimized additional design parameter in order to improve the output characteristics and efficiency of previous produced 2pole 18 slot 110kW motor model and how the width of airgap affects from the loss perspective is mainly analyzed. Finally, the analysis on the extent of the efficiency improvement effect compared to the previous model has performed through electromagnetic FEM analysis. The influence of airgap flux density distribution has also been thoroughly examined.

Key Words : PMSM, Loss reduction, Eddy current loss, Harmonics

1. 서 론

증가토크 부하는 속도의 상승에 따라 부하가 증가하는 부하로 터보기기, 견인부하 등이 이에 해당된다. 이러한 부하는 통상 속도의 제곱에 비례하여 토크가 증가하고, 이에 따라 속도의 제곱에 비례하여 출력이 증가하게 된다[1]. 증가토크 부하의 대표적인 예로는 터보기기, 차량 및 철도 구동용 전동기를 들 수 있으며, 본 논문에서 소개된 110kW 급의 PMSM 모델의 경우, 최근 연구가 진행되는 경량전철용 추진 시스템에도 적용 가능한 용량에 해당하며, 동일 용량의 PMSM이 최근 개발한 한국형 경량전철(K-AGT)의 구동 전동기로 연구, 개발된 사례도 있다. 본 논문에서 소개된 110kW급 전동기는 위에서 언급한 것과 같은 대형 부하의 요구 출력을 만족시키며 고출력밀도 설계에 따른 사이즈 저감으로 고효율화 실현을 설계 포인트로 삼았다. 동일 출력 내에서 고속화를 통한 사이즈 저감이 이루어졌으며 최대 회전속도는 20,000rpm으로 선정하였다. 고속화에 따른 회전자 안전성을 확보하기 위해 고출력 밀도를 위한 통자석 구조를 감싸는

retainer sleeve구조가 적용되었다. 이러한 sleeve재질은 재질에 따라 약간의 도전율을 가지고 있기 때문에 고속 운전 시 와전류 손실이 발생하게 되며, 더구나 슬롯 고조파에 의한 자속 변화가 영구자석에 영향을 미치기 이전에 sleeve 구조에서 먼저 와전류 손실을 발생하게 된다. 발생된 와전류 손실은 열의 형태로 변환되어 영구자석의 온도를 높여 영구자석 특성을 나쁘게 해 출력감소를 가져올 수 있다[2]. 따라서 이와 같은 구조에서 발생하는 와전류 손실에 대한 감소 대책이 요구되었다. 본 논문에서는 전동기 형상 파라미터 최적 설계가 전동기 특성에 미치는 영향을 분석하였으며, 특히 회전자 sleeve구조에서의 와전류 손실에 미치는 영향에 대해 전자기 유한요소 해석을 통해 집중적으로 분석하였다.

2. 본 론

2.1 제약조건 및 기초모델 도출

110kW급 PMSM 설계에 앞서 우선 전동기의 목적에 맞는 부하의 산정이 요구된다. 전동기 부하 특성에 따라 운전속도에서의 부하토크가 결정되며, 운전영역 및 요구 토크를 산정하는 것은 전동기 설계에 앞서 가장 기초적인 과정이 된다. 본 논문에서 소개된 110kW급 PMSM의 부하는 증가토크 부하라고 가정하였으며, 이것은 속도에 따라 통상 그림 1과 같은 속도의 제곱에 따르는

† Corresponding Author : Dept. of Railway Vehicle System Engineering, Korea National University of Transportation, Korea
E-mail : krhwlee@ut.ac.kr

* Dept. of Electrical Engineering, Hanyang University, Korea
Received : April 28, 2015; Accepted : April 13, 2015

요구 토크를 나타내게 된다. 본 전동기의 요구 출력은 20,000rpm에서 110kW로 정하였으며, 이러한 부하를 만족하는 기저속도에 따른 전동기 출력 모델의 경우 그림 2와 같은 경우를 예로 들었다. 이때, 약자속 제어 없는 출력모델의 경우, 다른 출력 모델에 비해 전동기 사이즈 감소를 통한 재료비 저감 및 철손 감소를 통한 효율 향상 등의 유리한 면이 있기 때문에[3] 본 논문의 기초 전동기 모델의 출력 곡선은 위의 경우로 선택하였다.

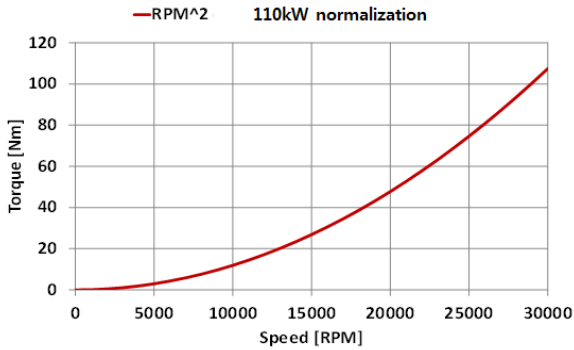


그림 1 증가토크 부하 예시
Fig. 1 example of increased torque load

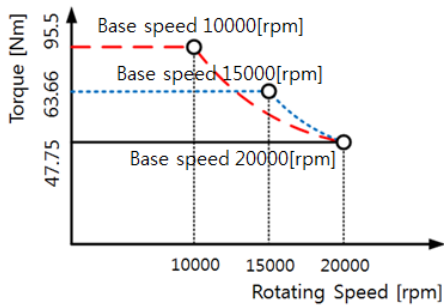


그림 2 기저속도에 따른 전동기 출력 모델
Fig. 2 motor output torque model according to base speed

이 외의 기타 설계파라미터로는, 전류밀도 및 공극너비, 점적률 등이 있으며 이러한 파라미터들은 사용하는 냉각방식, 제작 용이성 및 가공 정밀도 등을 고려하여 선택해야 한다. 여기서는 강제 공냉방식을 적용하여 전류밀도 제한은 $5A/mm^2$ 로 제한하였으며, 공극너비는 제작성을 고려해 1mm를 선택하였고 점적율은 0.35로 선택하였다. 또한, 고속기임을 고려하여 운전속도와 스위칭 주파수 등을 고려하여 극수는 2극으로 선택하였고 이에 따른 고정자 슬롯 조합을 변경해 출력밀도, 효율, 토크리플, 제작성 등의 항목을 비교 결과 2극 18슬롯의 조합이 결정되었다. 영구자석 재질은 열에 대한 내성이 우수한 사마륨 코발트 영구자석을 사용하였다.

2.2 고속 회전 적합형 PMSM 모델 설계

위와 같은 설계 요구사항 및 제약조건을 만족하는 PMSM 설

계를 진행하였다. PMSM 설계 시 선택할 수 있는 전동기 타입으로는 표면부착형 영구자석 동기 전동기(SPMSM), 매입형 영구자석 동기 전동기(IPMSM), In-set type 전동기 등이 있을 수 있으나, 본 논문에서는 초기 설계 모델로 제작 및 제어가 용이한 SPMSM 타입 전동기를 목표 비교 모델로 삼았다. 반면, 고속회전을 통한 출력밀도 향상에 유리한 고속 회전 적합형 PMSM 모델이 제안되었다. 비교 모델이 되는 2극 18 슬롯 110kW 급의 SPMSM의 최종 설계결과와 고속회전 적합형 모델의 비교가 아래 표 1에 나타나 있다. 표 1에서 확인할 수 있듯이 고속회전 적합형 PMSM 모델은 고속 회전에 적합하도록 통자석 구조를

표 1 일반 PMSM모델과 통자석형 PMSM 모델의 특성 비교
Table 1 characteristic comparison of common PMSM model with whole magnet type PMSM model

항목	일반 PMSM 모델	통자석형 PMSM 모델
타입	표면부착형	통자석형
상수/극수/슬롯수	3/2/18	
정격속도/정격출력	20,000rpm/110kW	
효율	91.2%	92.6%
출력밀도	12.0W/cm ³	15.8W/cm ³
사이즈 (고정자의경/회전자의경/적층길이)	280/124/149mm	250/87/142mm
재질 (영구자석/코어)	SmCo17/S08	

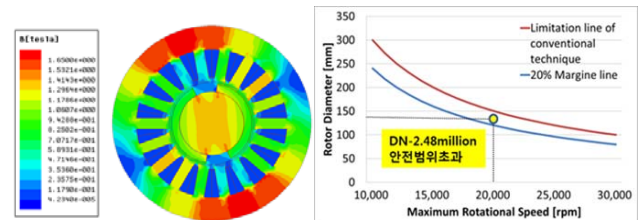


그림 3 일반PMSM 모델 FEM 해석 결과 및 회전체 안전도 평가
Fig. 3 common PMSM model FEM analysis result and rotor safety evaluation

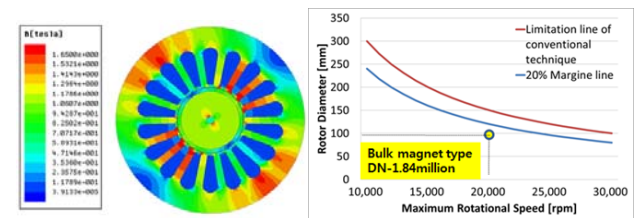
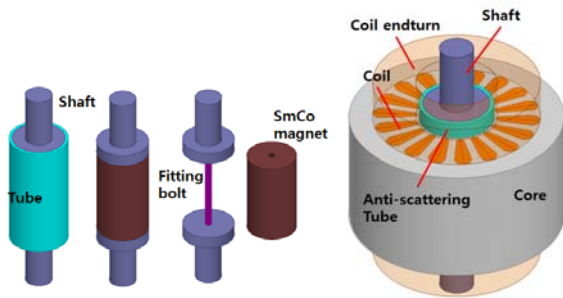


그림 4 통자석형 PMSM 모델 FEM 해석 결과 및 회전체 안전도 평가
Fig. 4 whole magnet type PMSM model FEM analysis result and rotor safety evaluation

retainer sleeve로 감싸는 형상으로 적용하였으며, 이를 통한 출력밀도 상승으로 동일 출력 대비 사이즈를 저감하였다. 출력밀도 비교 시 일반 PMSM 모델에 비해 통자석형 PMSM 모델은 약 31.7% 증가한 것을 볼 수 있다.

그림 3, 4에 일반 PMSM 모델 및 통자석형 PMSM 모델의 최종 설계 형상 및 구동 시의 자속밀도 분포가 나타나있다. 일반 PMSM 모델과 통자석형 PMSM 모델 모두 동일 scale의 자속밀도 분포 plot을 확인할 수 있다. 여기서는 일반 PMSM 최종 설계모델이 고속회전에 적합하지 않음을 DN-value를 통하여 확인하였다. DN-value는 회전 시 회전체의 안전도의 판별에 관한 기준으로 회전체의 직경과 회전속도로써 구해지는 값이다[4]. 본 논문에서는 20% 마진을 포함한 DN-value를 적정 설계 목표로 가정하였다. 그림 3에 나타난 일반 PMSM 모델의 경우 상대적으로 낮은 출력 밀도 때문에 정격 운전속도인 20,000rpm에서 DN-value가 20% 마진을 넘어선 것을 확인할 수 있으며 이와 반대로 통자석형 PMSM 모델은 출력밀도 증가를 통한 사이즈 감소로 20% 마진 아래로 들어온 것을 확인할 수 있다. 110kW 전동기설계의 기초 제작모델로 고속회전 적합형 통자석 구조 모델을 선택하여 실제로 제작하였다. 그림 5는 실제 제작, 시험된 통자석형 PMSM 모델의 구조도 및 제작 형상이며, 제작 후 다이내모 시험을 통한 출력 및 효율 실측 데이터가 표 2 시험데이터에 나타나 있다. 손실은 설계 모델의 FEM 결과를 바탕으로 추정되었으며 전체 손실을 고려한 효율은 92.61%를 나타내었다.



(a)



(b)

그림 5 (a) 통자석형 PMSM 모델 회전자 구조 및 조립체 모습 (b) 다이내모 시험 모습

Fig. 5 (a) whole magnet type PMSM rotor structure and motor assembly (b) dynamo test

표 2 통자석형 PMSM 모델 손실 분류 및 시험 결과

Table 2 loss categorization of whole magnet type PMSM model and test result

항목	I _a [Arms]	V _a [Vrms]	Torque [Nm]	Copper loss [W]	Core loss [W]	Solid loss [W]	Eff. [%]
값	212.1	175.4	51.5	438.8	700.3	1222	92.6

인버터 전류 제한 : 217Arms, 전압제한 : 177Vrms

설계 모델의 FEM 결과를 통해 비교할 때, 전체 손실 중 와전류 손실분을 나타내는 solid loss가 전체 전자기 손실 중 약 51.8%를 차지한다. 이 중 약 95%의 손실이 대부분 retainer sleeve 구조에서 발생하는 와전류 손실이다. 본 논문에서는 통자석형 전동기의 주요 전자기 손실 원인으로 retainer sleeve 구조에서의 와전류 손실을 들었으며, 고속화에 따른 사이즈 저감을 통한 고효율 목표를 달성하기 위해서는 와전류 손실 저감이 이루어져야 한다고 판단하였다. 또한 추가적인 형상 최적화를 통해 철손 손실저감도 목표로 삼았다.

2.3 고정자 형상 최적화를 통한 철손 감소

철손은 흔히 아래 식으로 표현된다[5].

$$W_c = C_h f B_{pk}^n + C_e f^2 B_{pk}^2 \quad [W/kg] \quad (1)$$

C_h : hysteresis loss coefficient
 C_e : eddy current loss coefficient
 B_{pk} : peak flux density
 f : frequency

위의 Steinmetz equation의 우변의 첫째항은 철손 중 히스테리시스 손실에 관한 부분이고 두 번째 항은 와전류 손실에 관한 부분이다. 여기서 n은 통상 1.6에서 2.2사이의 값을 갖는다. 위의 식은 체적 당 발생하는 손실에 관한 식으로 자속 포화가 크게 일어난 부분의 체적을 최소화 하면 전체 발생 손실을 저감할 수 있음을 알 수 있다. 아래 그림6 에서 나타나는 것처럼 초기 설계 모델에 비해 개선 모델에서는 고정자 슈 부분의 형상 최적화를 통해 고정자 철손 발생량을 최소화 하였다.

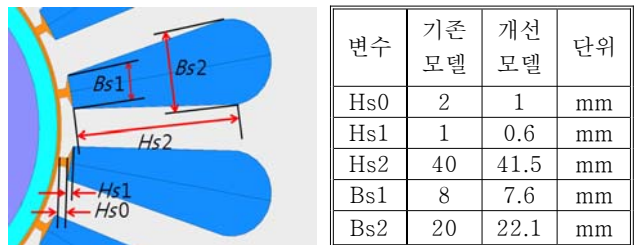


그림 6 철손 저감을 위한 고정자 최적 설계 결과

Fig. 6 stator design optimization for core loss decrease

2.4 고정자 형상 최적화를 통한 철손 감소

와전류 손실은 도체에 대해 변화하는 자속성분이 기전력을 유도하여 유도전류가 흐름으로써 발생하는 손실로 아래 식을 따른다[5].

$$p = \frac{c^2}{12\rho} \left(\frac{dB}{dt} \right)^2 [W/m^3] \quad (2)$$

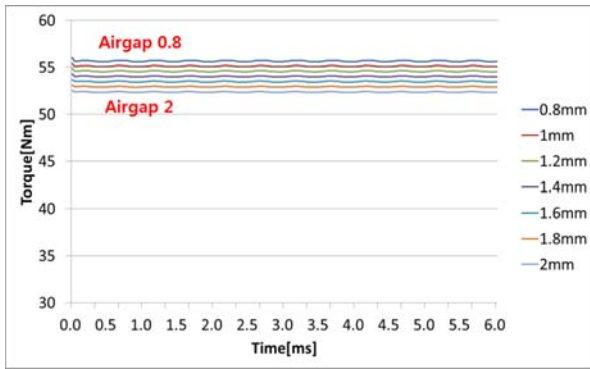
p: eddy current loss per volume
c: width of the conductor
ρ: resistivity
B: magnetic flux density

위 식에서 확인할 수 있듯이 와전류 손실의 크기는 도전율을 갖고 있는 도체의 저항률, 형태 및 자속의 변화분 등에 관련 있는 양이다. 이 중 특히 자속의 변화분이란 동기기에서는 슬롯 고조파 및 스위칭 고조파와 관련 있는 것으로, 회전속도에 직접적으로 영향이 있는 성분이며, 전동기가 고속 회전을 할수록 그 성분이 커지므로 고속 회전 시에 와전류 손실이 커지게 되는 원인

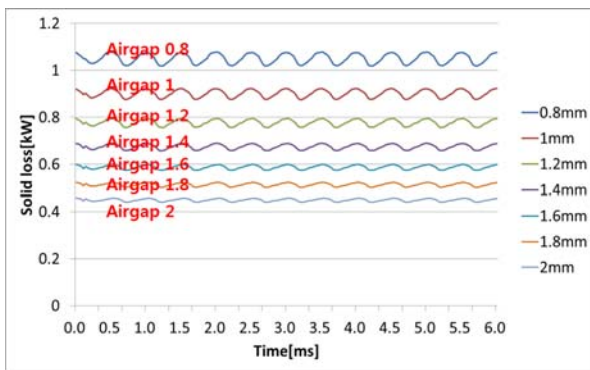
이된다[6,7].

와전류 손실 감소측면에서는 우선 해당 형상에서 강도 해석을 통한 retainer sleeve 두께의 최소화를 통한 와전류원의 파괴 최소화를 진행하였다. 그 결과, 기존의 1차 제작 모델의 4.5mm 두께에서 3.5mm로 감소하였다. 또한, retainer sleeve 관련 설계 parameter로 동일 회전자 형상에 대해 공극 너비(air gap width)를 변화하며 retainer sleeve에서의 와전류 손실양 변화를 해석을 통해 확인하였다. 아래 plot에서 airgap 0.8[mm]에서 0.2[mm]간격으로 해석 결과를 비교하였으며 parameter 변화에 따른 출력(토크)와 와전류 손실 비교를 확인할 수 있다. 여기서의 출력 토크는 손실에 따른 출력 감소를 고려하지 않은 값이며 차이를 표현하기 위해 y-축의 범위는 30Nm~60Nm로 나타내었다.

아래 plot은 공극 0.8mm 모델과 2mm 모델의 회전자 표면 동일 위치에서의 공극자속밀도 파형을 나타낸다. 공극자속 밀도가 원주를 따라 표현되기 때문에 sine 파형 형상으로 나타난다. 공극 0.8mm 모델의 plot에서 확인할 수 있듯이, 공극자속 밀도 파형에 일정 주기의 리플이 형성됨을 파악할 수 있으며 이는 슬롯 고조파에 의한 것으로 슬롯 수와 동일한 개수의 ripple이 형성되



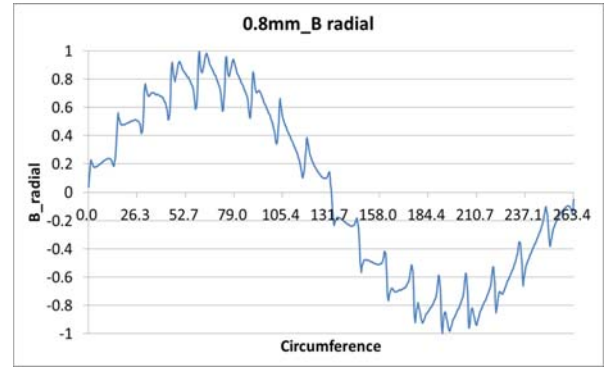
(a)



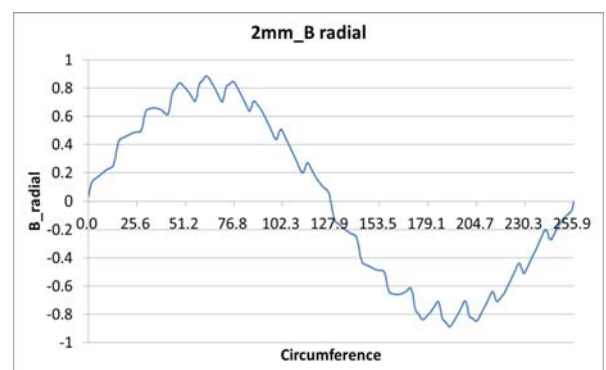
(b)

그림 7 공극 너비에 따른 출력 특성 비교 (a) 토크 특성 변화 (b) 와전류 발생량 변화

Fig. 7 output characteristic comparison according to airgap width (a) torque characteristic (b) eddy current loss characteristic



(a)



(b)

그림 8 공극 너비 변화에 따른 회전자 표면에서의 공극자속 밀도 파형 비교 (a) 0.8mm 모델 (b) 2mm 모델

Fig. 8 air gap flux density waveform plot according to air gap width changing (a) 0.8mm model (b) 2mm model

어 있음을 확인할 수 있다. 반면 2mm 모델의 plot에서는 그 영향이 상대적으로 훨씬 감소함을 확인할 수 있다. 고정자 치로부터 멀어짐에 따라 공극 자속밀도의 magnitude 역시 낮아짐을 확인할 수 있는데 이것은 발생토크 감소의 경향성과 같다. 아래의 plot 결과는 비교대상 중 두 개의 극값을 나타내며 나머지는 그 중간의 값에 위치한다.

표 3 공극 자속 밀도 파형 FFT 결과 비교

Table 3 air gap flux density waveform FFT result comparison

Fourier series line spectra amplitude	기본과	3고조파	5고조파	7고조파
0.8mm 모델	0.8496	0.0067	0.0171	0.0153
2mm 모델	0.8205	0.0054	0.0165	0.0132

위의 해석 결과를 바탕으로 초기 제작모델과 개선 모델의 전자기적 출력, 손실 및 효율 특성을 나타내었다. 출력과 손실 면에서 고려하였을 때, 최적 airgap은 1.6mm로 선택하였다. air gap 부분이 큰 형상의 경우 출력 면에서 불리할 것으로 생각되나 전체 입력에 대한 손실이 적음을 고려 할 경우에는 오히려 높은 출력을 나타낼 수 있음을 아래 결과에서 확인할 수 있다. 표 4에서 동일 입력 전류(212.2Arms)에서의 약 110kW의 동일 입력 전류 인가 시, 전자기 손실의 총 합은 초기 모델의 경우 약 2.3kW, 1.6mm air gap 모델인 개선 모델의 경우 약 1.6kW 수준이다. 기계손 및 풍손 등의 손실은 전체 출력대비 동등한 수준의 비율을 갖는 것으로 가정 하였다. 이때, 동일 입력 대비 손실량의 차이가 발생하면서 발생 토크역시 개선 모델이 약 1Nm 증가하였으며, 효율 면에서는 출력 상승의 효과로 약 0.7%의 향상이 이루어 졌음을 확인할 수 있었다.

표 4 초기 제작 통자석형 PMSM 모델과 개선 모델의 동일 출력에서의 출력 특성 비교

Table 4 output characteristic comparison of prior whole magnet type PMSM model and improved design model

	입력 전력 (kW)	토크 (Nm)	동손 (W)	철손 (W)	와류손 (W)	효율 (%)
초기 제작모델	109.8	51.3	438.8	700.3	1222.0	92.8
개선모델 (1.6mm gap)	111.1	52.3	438.8	658.7	600.8	93.5

3. 결 론

본 연구에서는 110kW급 고회전밀도형 PMSM의 설계과정에 대해서 다루었다. 고속 회전 적합형 PMSM 모델은 통자석 구조를 이용한 출력밀도 상승으로 동일 출력 대비 사이즈를 저감하여 일반 PMSM 타입의 전동기에 비해 고회전밀도를 달성하였다. 그러나 고속회전 적합형 통자석 구조형 PMSM 모델의 출력 특성을

살펴본 결과, 회전자표면의 retainer sleeve 구조에서의 와전류 손실이 주요 손실원이 됨을 확인하였고, 이를 개선하기 위해 형상 파라미터 변경을 통한 추가적인 최적 형상 설계를 진행하였다. 이 과정에서 전동기 공극 너비가 약 60% 증가하였으나, 이를 통해 retainer sleeve에서 약 51%의 와전류 손실 저감이 있었으며, 결과적으로 오히려 전체 출력 및 효율이 증가하였다. 통상적으로 고회전, 고효율을 달성하기 위해 전동기 설계에 있어 공극 너비를 가능한 작게 설계하는 경향이 있으나, 오히려 손실 증가 및 이로 인한 출력 감소 측면에서 불리할 수도 있음을 해석 결과로써 보였다.

감사의 글

본 연구는 2013년도 지식경제부의 재원으로 한국에너지기술평가원(KETEP)의 지원을 받아 수행한 연구 과제입니다. (No.20132010101870)

References

- [1] Sheng-Ming Yang, "A Constant Air Flow Rate Control of Blower for Residential Applications", IEEE Transactions on Industry Applications, Vol.34, No.2, Mar/Apr. 1998.
- [2] Luise. F, Tassarolo. A, Pieri. S, Raffin. P, Di Chiara. M, Agnolet. F, Scalabrin. M, "Design and Technology Solutions for High-efficiency High-speed Motors", Electrical Machines(ICEM), 2012 International Conference on, 2012.
- [3] F. Magunssen, P. Thelin, Sadarangani, "Design of compact permanent magnet machines for a novel HEV propulsion", Proceedings of Electric Vehicle Symposium, 2003.
- [4] Harold H. Coe, Herbert W. Scibbe, and William J. Anderson, "Evaluation of Hollowed(Drilled) Balls in Ball Bearings at DN Values to 2 Million", NASA Technical Memorandum, Jan. 1970.
- [5] J. Cyselinck, L.vindevelde and J. Melkebeek, "Calulation of Eddy Current and Associated Losses in Electrical Steel Laminations", IEEE Transactions on Magnetics, Vol.35, No.3, May. 1999.
- [6] Katsumi Yamazaki, Yu Fukushima and Makoto Sato, "Loss analysis of permanent-magnet motors with concentrated windings-Variation of magnet eddy-current loss due to stator and rotor shapes", IEEE Transactions on Industry Applications, 45(4), pp. 1334-1342, 2009.
- [7] Manoj R. Shah and Ayman M. EL-Refaie, "Eddy-Current Loss Minimization In Conducting Sleeves Of Surface PM Machine Rotors With Fractional-Slot Concentrated Armature Windings By Optimal Axial Segmentation And Copper Cladding, IEEE Trans. on Industrial Applications, Vol. 45, pp.720-728, Mar./Apr. 2009.

저 자 소 개



전 현 우(Hyun-Woo Jun)

1987년 8월 27일 생. 2012년 한양대학교 전기공학과 졸업. 2014년 동 대학원 공대 전기공학과 졸업(석사). 현재 동 대학원 전기공학과 박사과정.

Tel : 02-2220-0349

Email : jhwinc@naver.com



박 응 석(Eung-Seok Park)

1954년 2월22일생. 1973~1999년 철도청(전기주사). 1999년~현재 ㈜디투엔지니어링 사장. 2004년 서울산업대학교 전기공학과 졸업. 2012년 한양대학교 공학대학원 철도시스템공학과 졸업(석사). 2013년~현재 한양대학교 대학원 전기공학과 박사과정.

Tel : 02-969-4938

E-mail : pes0222@hanmail.net



이 주(Ju Lee)

1963년 8월 30일생. 1986년 한양대 전기공학과 졸업. 1988년 동 대학원 전기공학과 졸업(석사). 1988~1993년 국방과학연구소 연구원. 1997년 일본 큐슈대학교 System 정보과학연구과 졸업(박사). 1997년 한국철도기술연구원 선임연구원. 1997년~현재 한양대 전기생체공학부 교수.

Tel : 02-2220-0349

E-mail : Julee@hanyang.ac.kr



이 형 우(Hyung-Woo Lee)

1974년 1월 11일 생. 1998년 한양대학교 전기공학과 졸업. 2000년 동 대학원 전기공학과 졸업(석사). 2003년 Texas A&M University 졸업(박사). 2004년 Department of Theoretical and Applied Mechanics, Corenll Universiy 박사 후 과정. 2005년 한양대학교 BK division 계약 교수.

2006~2012 한국철도기술연구원 Senior researcher 재직. 2013년~현재 국립한국교통대학교 부교수.

Tel : 070-8855-1652

E-mail : krhwlee@ut.ac.kr