집중권을 시행한 영구자석 매입형 동기전동기의 철손 저감

Core-loss Reduction on Permanent Magnet for IPMSM with Concentrated Winding

이형우^{1*} · 박찬배¹ · 이병송¹

Hyung-Woo Lee · Chan-Bae Park · Byung-Song Lee

Abstract Interior Permanent Magnet Synchronous motors (IPMSM) with concentrated winding are superior to distributed winding in the power density point of view. But it causes huge amount of eddy current losses on the permanent magnet. This paper presents the optimal permanent magnet V-shape on the rotor of an interior permanent magnet synchronous motor to reduce the core losses and improve the performance. Each eddy current loss on permanent magnet has been investigated in detail by using FEM (Finite Element Method) instead of equivalent magnetic circuit network method in order to consider saturation and non-linear magnetic property. Simulation-based design of experiment is also applied to avoid large number of analyses according to each design parameter and consider expected interactions among parameters. Consequently, the optimal design to reduce the core loss on the permanent magnet while maintaining or improving motor performance is proposed by an optimization algorithm using regression equation derived and lastly, it is verified by FEM.

Keywords : IPMSM, Core loss, Concentrated winding, PM eddy current loss, Simulation-based DOE

초 록 집중권 방식의 견인용 영구자석 매입형 동기전동기(IPMSM)는 출력밀도의 관점에서 우수하나 심각한 영구자석 와전류 손실을 가지고 있다. 본 논문에서는 영구자석 매입형 동기전동기의 자기적 특성을 분석하여 V-타입 회전자 영구자석의 각도와 폭을 변경함으로써 철손을 최소화하는 최적설계를 수행하였다. 자성체의 비선형성을 고려하기 위하여 자기등가회로법 대신 유한요소법을 이용하였으며, 각 파라메타가 영구자석에 발생하는 철손에의 영향 및 파라메타간의 교호작용을 파악하기 위하여 시뮬레이션 기반의 실험계획법을 사용하였다. 이를 통하여 모터의 성능을 유지하면서 철손을 상당히 줄인 집중권 방식의 영구자석 매입형 동기전동기의 최적설계를 반응표면법을 이용하여 도출하였으며, 유한요소법을 이용하여 이를 검증하였다.

주요어 : 영구자석 매입형 동기전동기, 철손, 집중권, 영구자석 와전류 손실, 실험계획법

1. 서 론

전기자동차 또는 전기철도와 같은 교통시스템에 사용되는 견인용 모터는 효율 향상뿐만 아니라, 출력밀도 향상을 위한 많은 연구가 이루어졌다. 고출력밀도 설계를 위해서는 전기장하와 자기장하를 모두 증가시켜야 하는데 자기장하를 위해서는 희토류 자석을 사용하고 전기장하를 위해서는 분할코어를 이용하여 점적률을 두배 이상 증가시키는 기술이 적용되었다[1,2]. 또한, 집중권 방식의 IPMSM의 극호 대 극간격 비를 계산하여 역기전력의 고조파를 줄이므로써 출력밀도 향상에 기여하는 방법도 제시되었다[3].

특히, 철도용 견인 모터의 출력밀도는 고속철도의 경우 0.7~0.8kW/kg, 일반철도의 경우 0.3~0.4kW/kg로 전기자동차용 견인모터의 경우인 1.5~2.0kW/kg에 비하여 많이 뒤떨어져 있으므로 출력밀도 향상을 위하여 영구자석 매입형 동기전동기(IPMSM, Interior Permanent Magnet Synchronous Motor)가 경전철부터 고속철까지 세계적으로 활발히 적용되

는 추세이다.

하지만, 영구자석 매입형 동기전동기에 사용되는 영구자석은 태생적으로 도전율을 가지고 있으며, 운전 시 고조파로 인하여 심각한 와전류 손실을 발생한다[4,5]. 이를 저감하기 위하여 영구자석의 형상에 대한 다양한 연구가 이루어졌다[6]. 여러 영구자석 매입형 동기전동기 중에서, 출력밀도의 관점에서 보면 엔드코일(end coil)이 짧은 집중권 방식이 분포권 방식에 비해 우수하나, 영구자석에 발생하는 와전류 손실이 약 100배 이상으로 집중권 사용에 어려움이 있으므로 이를 반드시 저감시켜야 한다. 본 논문은 영구자석 매입형 동기전동기의 자기적 특성을 분석하여 여러 가지 설계 변수 중에서도 V-타입 회전자 영구자석의 각도와 그 사이의 웹 폭을 변경함으로써 영구자석의 와전류 손실을 최소화하고 성능을 향상시키는 최적설계를 수행하였다.

2. 본 론

2.1 영구자석 매입형 동기전동기의 기본설계

집중권을 시행한 영구자석 매입형 동기전동기의 영구자석에 발생하는 와전류 손실을 분석하기 위하여, 우선 110kW

*교신저자 : 한국철도기술연구원 고속철도연구본부
E-mail : krhwlee@krrri.re.kr

¹한국철도기술연구원 고속철도연구본부

Table 1 Specifications of the initially designed 110kW IPMSMs

Variables	Concentrated winding	Distributed winding
Phase / Poles	3phases / 6poles	
Rated / Maximum Speed	2,400RPM / 6,000RPM	
Torque at the Rated / Maximum Speed	433Nm / 75Nm	
Stack length	280mm (without end-turn)	
Permanent magnet	Nd-Fe-B ($B_r=1.15T$)	
Number of slots	9	36
Outer diameter	316	318
Current	$400A_{peak}$	$400A_{peak}$
V_{dc}	750V	750V
L_d	0.269184674mH	0.294657505mH
L_q	0.286730263mH	0.607700808mH
Beta angle	20degree	40degree

Fig. 1 1/3 Cross-sectional view of the original models of the 110kW IPMSMs **Fig. 2** Copper losses, Core losses and magnet eddy current losses of the original models of the 110kW IPMSMs

급 경전철용 견인전동기를 설계하였다.

분포권과의 비교분석을 위하여, 집중권과 분포권 두 가지 모두를 등가자기회로법을 이용하여 설계하였으며 유한요소법으로 그 특성을 분석하였고, Fig. 1과 Table 1에 나타내었다. Table 1에서 보듯이, 집중권이 분포권에 비하여 동일 출

력에서 크기가 작아 출력밀도가 높은 것을 알 수 있다.

Fig. 2는 각각 집중권과 분포권의 기본 설계 모델을 2차원 전자장 수치해석 프로그램인 MAXWELL을 이용하여 구한 손실을 나타낸다. 기저속도 및 최고속도에서 집중권 방식이 분포권 방식에 비해 더 많은 손실을 나타내고 있으며,

동손은 양 방식에서 거의 동일하지만, 영구자석의 와전류 손실은 집중권이 분포권에 비하여 100배 이상 크다. 따라서, 집중권 방식의 영구자석 매입형 동기전동기가 견인전동기에서 요구되는 출력밀도 향상에 기여한다 할지라도, 이러한 영구자석에서의 와전류 손실은 전동기의 효율을 급격히 저하시키는 문제를 수반하므로 이를 반드시 저감시켜야 한다.

2.2 영구자석매입형 동기전동기의 시뮬레이션 기반 실험계획법

실험계획법은 실험에 대한 계획방법으로, 해결하려는 문제에 대하여 통계분석을 통하여 최소의 실험 횟수로부터 최대의 정보를 얻도록 계획하는 것으로 다양한 변수에 대한 목적함수의 영향을 고려하는데 널리 사용된다. 특히, 전기기기의 설계에 있어서 여러 설계변수에 대한 토크, 효율 등 기기의 성능을 목적함수로 하여 널리 사용되고 있다. 수치해석의 발달과 향상된 정확성은 회전전동기의 경우, 실험과 아주 근소한 오차를 나타내므로 대부분의 실험은 시뮬레이션으로 대체할 수 있다.

특히 여러 설계인자를 고려한 최적설계를 수행할 경우, 각각의 경우에 맞도록 시제품을 제작하고 시험하는 것은 현실적으로 시간상, 비용상 불가능하다. 따라서 본 논문에서는 시뮬레이션을 사용한 실험계획법을 수행하였으며, 시뮬레이션은 전자장 수치해석을 이용한 유한요소법을 사용하였다. 출력밀도가 높은 집중권을 시행한 영구자석 매입형 동기전동기의 영구자석에서의 와전류 손실을 저감시키고 효율을 향상시키기 위하여 Fig. 3과 같이 회전자와 고정자의 다양한 설계변수가 고려되었다.

고려하는 설계변수는 많으면 많을수록 정확성이 높아지므로 최대한의 설계변수와 수준을 설정하는 것이 바람직하나 설계변수의 증가는 대량의 시뮬레이션을 요구하므로 이에 대한 적절한 고려가 필요하다. 본 연구에서는 Fig. 3과 같이, 고정자의 요크 두께, 치 슈의 폭, 슬롯 개구폭을 선정하였고, 회전자에서는 영구자석의 사잇각, 영구자석과 공극과의 거리, 웹 폭을 선정하여 총 6개의 설계 인자를 정하였으며, 최적설계의 목적함수를 토크, 토크리플, 와전류 손실, 효율

Fig. 3 Design variables for the simulation-based design of experiment

로 정하여 각각의 시뮬레이션을 수행하고 결과를 분석하였다.

실험계획법에서 설계인자수(n)와 가능한 수준(m)을 증가시키고, 상호 교호작용을 고려하면, 필요한 실험은 m^n 개로 급격히 늘어나므로 방대한 실험 또는 시뮬레이션이 요구된다. 따라서 본 논문에서는 상호 교호작용을 고려하기 전에 우선 각 설계인자 별 각각의 목적함수를 분석하였다.

2.3 다양한 설계변수에 따른 실험계획법 분석 결과

기저속도 2400rpm, 400A, β 각 20도에서의 고정자 세 개와 회전자 세 개의 설계 변수에 대한 해석 결과를 Fig. 4에 나타내었다. 본 해석을 통하여 어떤 변수가 어떤 목적함수에 영향을 주는 지, 그 영향도의 크기는 어떤지 알 수 있으며, 최적설계를 위한 완전요인법에 어떤 변수를 사용할 지 정할 수 있다.

각 파라메타별 목적함수의 영향을 보면, 고정자 측면의 경우 첫째, 고정자 요크 두께는 클수록 고토크, 저토크리플, 고효율, 저손실의 경향을 보였다. 하지만, 요크 두께의 무한 증가는 전동기의 사이즈 및 무게를 증가시켜 출력밀도에 악영향을 미치므로 자기포화가 일어나지 않는 19.5mm 이상 증가시키지 않았다. 둘째, 슬롯 개구폭은 작을수록 여러면에서 긍정적인 효과를 나타내고 있으나, 작은 개구폭은 권선 및 절연지 삽입 등의 어려움이 발생하므로 이를 고려하여 8mm로 정하였다. 셋째, 치 슈의 폭은 해석결과, 영구자석의 와전류 손에 큰 영향이 없는 것으로 나타났으며, 토크 리플 저감 측면에서 1.5mm가 적절한 값으로 판단되었다.

회전자 측면의 경우 첫째, 세 개 설계 변수 중 영구자석의 사잇각은 토크 및 와전류손실에 영향을 주는 것으로 나타났으며 따라서 적절한 각도 선정이 필요하다는 것을 알 수 있다. 둘째, 영구자석과 공극과의 거리는 멀수록 더 나은 결과를 보이나 회전자 내부로 깊이 들어갈수록 방열 성능의 저하 및 이로 인한 고온감자가 우려되므로 최대 4mm로 선정하였다. 셋째, 웹 폭은 작을수록 고토크, 고효율을 나타내나, 웹 폭이 작으면 충분한 기계적 강도를 유지하지 못하므로 2mm 이하로 선정이 어려우며, 이에 대한 좀 더 면밀한 검토가 필요하다.

이상의 부분요인법(PFD, Partial Factorial Design)의 분석 결과를 토대로, 고정자의 세 개 변수와 회전자 변수 한 개는 고정된 값을 주고 회전자 세 개 변수 중 영구자석의 사잇각과 웹 폭의 수준을 각각 3 수준으로 하여 차후의 완전요인법(FFD, Full Factorial Design)을 수행하였다.

2.4 반응표면법을 이용한 최적설계

영구자석의 사잇각과 웹 폭의 수준을 각각 3 수준으로 수행한 완전요인법과 각 경우의 유한요소해석 결과로부터, 다음 식과 같이 2,400rpm과 6,000rpm에서의 회귀식을 도출하였다. 각 식에서 A는 영구자석의 사잇각을, B는 웹 폭을 나타낸다. 식(1-4)는 2,400rpm에서의 각 목적함수인 토크, 토크리플, 영구자석의 와전류 손, 효율에 대한 회귀식이며, 식(5-8)은 6,000rpm 최고속도에서의 각 목적함수에 대한 회귀

Fig. 4 Effects of each design variable on design objectives at the rated speed

식이다. 회귀식은 실험계획법을 통해 얻은 각 경우의 시뮬레이션 값을 다꾸지법을 이용하여 통계적으로 구하였으며, 일련의 과정은 상용프로그램인 Minitab을 사용하였다[7].

위의 회귀식과, 최적 알고리즘으로서 반응표면법(Response Surface Method)을 이용하여 Fig. 5에 영구자석의 사잇각과 웹 폭에 따른 각 목적함수의 효과를 도시하였다. 그림에서 보면, 모터의 기저속도와 최고속도에서 영구자석의 사잇각과 웹 폭의 변화에 따라 목적함수 값이 변화하는 것을 볼 수 있으며, 각 목적함수가 가장 좋은 결과를 내도록 변수값을 선정할 수 있다.

일반적인 철도차량의 경우, 높은 가속도가 요구되는 기저속도에서는 토크가 중요하고 연속운전을 하는 최고속도에서는 손실 및 효율이 중요하다. 본 논문에서는 영구자석의 와전류 손실 저감이 주 목적이나, 토크와 전체 효율을 무시하고 와전류 손실의 저감만을 달성하는 것은 오히려 모터 성능에 악영향을 미치므로 영구자석의 와전류 손실을 최우선으로 고려하되, 기저속도에서의 토크와 최고속도에서의 효율 또한 고려하였다.

$$\text{Torque} = 457.159 + 4.65554A + 0.925587B - 0.181582A^2 - 0.0321608B^2 - 0.228551AB \quad (1)$$

$$\text{Torque ripple} = 66.2935 + 48.9364A + 2.47462B - 10.3497A^2 - 0.0341697B^2 - 0.343482AB \quad (2)$$

$$\text{Magnet eddy current loss} = 0.284 + 0.0491A - 0.0237B + 0.05324A^2 + 0.00054B^2 + 0.0028AB \quad (3)$$

$$\text{Efficiency} = 98.6363 + 0.018169A + 0.0172861B - 0.0593377A^2 - 0.0004744B^2 - 0.001865AB \quad (4)$$

$$\text{Torque} = 139.552 + 16.7141A + 0.30062B - 2.45996A^2 - 0.00907059B^2 + 0.0193001AB \quad (5)$$

$$\text{Torque ripple} = 113.717 - 20.9833A + 0.447117B - 0.0215803A^2 - 0.0148294AB^2 - 0.0359AB \quad (6)$$

$$\text{Magnet eddy current loss} = 0.377434 + 3.443A + 0.0108B - 0.381A^2 - 0.00089B^2 - 0.00653AB \quad (7)$$

$$\text{Efficiency} = 97.4988 - 2.90431A + 0.000075B + 0.325A^2 + 0.000512555B^2 + 0.0071645AB \quad (8)$$

Fig. 5 Effects of selected design variables on design objectives

Table 2 Specifications of the optimally designed concentrated winding IPMSM

Variables		Values (Basic design)	Values (Optimal design)
Stator	Stator yoke	17.2mm	19.5mm
	Slot opening	32mm	8mm
	Shoe width	1.5mm	1.5mm
Rotor	Magnet angle	0degree	15degree
	Magnet offset	0mm	4mm
	Web width	3.36mm	1mm

해석결과로부터 웹 폭이 작을수록, 영구자석의 와전류 손실을 저감시켜 고효율을 얻을 수 있었으며 이때의 토크는 웹 폭이 큰 경우보다 작지만 요구 토크(기저속도에서 433Nm, 최고속도에서 75Nm)를 만족시킨다. 본 연구의 주된 목적이 기존 토크를 유지하면서도 철손을 저감시켜 효율을 향상시키는 것이므로, 이에 맞는 영구자석의 사잇각을 선정하여 기저속도 및 최고속도에서도 설계 요구 토크를 만족하면서 최고속도에서 효율을 높일 수 있음을 알 수 있다. 또한 토크 리플의 경우, 철도차량의 무게로 인하여 큰 영향을 받지 않으므로 이를 무시할 수 있다.

2.5 최적설계 결과

Table 2는 최적 설계된 영구자석 매입형 동기전동기의 설계변수를 나타낸다. 고정자 측 세개의 설계변수와 회전자 측 세개의 설계변수 중, 고정자 요크 두께, 슬롯 개구폭, 치 슈 폭, 영구자석과 공극과의 거리는 부분요인법의 결과를 그대로 사용하여 선정하였고, 나머지 두개 변수인 영구자석의 사잇각과 웹 폭은 회귀식과 반응표면법을 통하여 도출한 15도와 1mm로 선정하였다. 이 때의 웹 폭은 1/3 모델의 온주 기 조건 해석상 값이므로, N극과 S극 사이의 실제 폭은 2mm

Fig. 6 1/3 Cross-sectional view of the optimal design

이다.

Fig. 6은 Table 2에서 정한 최적설계 모델의 평면도이다. Fig. 1(a)와 비교하여, 고정자와 회전자 및 영구자석의 형상이 변화된 것을 알 수 있다.

Fig. 7은 최적 설계 모델의 유한요소법을 이용한 전자장 해석 결과를 나타낸다. 그림에서 보듯이, 토크는 기저 속도 및 최고속도에서 기존의 요구토크를 충분히 만족하고 있으

Fig. 7 Performance analysis of the optimally designed IPMSM with concentrated winding

며, 토크 리플은 기적속도에서 약 17%, 최고속도에서 약 49% 감소하였다. 또한, 본 논문의 주요 목적인 영구자석에서의 와전류 손실의 경우, 기존의 집중권 설계 모델로부터 각 변수에 대한 실험계획법을 실행하여 최적 설계를 수행한 결과, 기저속도에서는 96%, 최고속도에서는 54.15%로 상당히 감소하였으며, 이에 따라 효율도 각각 4.14%, 5.64% 향상 되었다.

출력밀도의 관점에서도 설계된 모터의 무게를 추정한 결과, 기존의 K-AGT 경전철용 견인모터는 0.17kW/kg이었으나, 최적설계된 모델은 0.67kW/kg으로 크게 개선되었다.

3. 결 론

본 논문에서는 경량 전철에 사용 가능한 110kW급 영구자석 매입형 동기전동기의 철손을 저감하는 최적설계를 수행하였다. 집중권을 시행한 영구자석 매입형 동기전동기의 경우, 분포권을 시행한 경우보다 출력밀도를 높일 수 있어 경량화 및 공간배치의 이점이 있으나, 회전자의 영구자석에 발생하는 커다란 와전류 손실로 인하여 분포권보다 효율이 나쁘고 이로 인하여 사용에 제약이 있다. 이를 극복하기 위하여, 여러 설계 변수를 선정하여 다구찌법에 의한 실험계획법 및 반응표면법을 수행하였다. 그 결과 기존 모터의 성능을 향상 또는 유지하면서 와전류 손실을 상당히 줄이고 효율을 향상시키는 최적 설계 모델을 도출하였으며, 유한요소법을 이용한 전자기장 시뮬레이션을 통하여 이를 검증하였다. 결과로부터 철도와 같은 대용량 기기에 있어서 일반적으로 사용되는 분포권 방식을 탈피하고 집중권 방식을 적용하여, 출력밀도뿐만 아니라 효율 향상을 이루었으며, 파라미터의 기준값에서 집중권 방식이 분포권 방식에 비해 우수함을 증명하였다.

참고문헌

- [1] K.-C. Kim (2008) A study on the optimal design and control performance of interior permanent magnet synchronous motor for EV/HEV, *Ph.D Dissertation*, Hanyang University, Korea (in Korean).
- [2] F. Magunssen, P. Thelin, Sadarangani (2003) Design of compact permanent magnet machines for a novel HEV propulsion system, *Proceedings of Electric Vehicle Symposium*, USA.
- [3] K.-J. Lee (2004) A study on the design of interior permanent magnet synchronous motor for HEV, *Ph.D Dissertation*, Hanyang University, Korea (in Korean).
- [4] Katsumi Yamazaki, Yuji Kanou et al. (2010) Reduction of magnet eddy-current loss in interior permanent-magnet motors with concentrated windings, *IEEE Transactions on Industry Applications*, 46(6), pp. 2434-2441.
- [5] Katsumi Yamazaki, Yu Fukushima and Makoto Sato (2009) 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.
- [6] S.-H. Han, Thomas M. Jahns, Z.Q. Zhu. (2010) Analysis of rotor core eddy-current losses in interior permanent-magnet synchronous machines, *IEEE Transactions on Industry Applications*, 46(1), pp. 196-205.
- [7] S.-B. Lee (2000) Example based Design of Experiment using the Minitab, *Eretec Inc.*, Korea (in Korean).

접수일(2011년 11월 21일), 수정일(2012년 2월 29일),
게재확정일(2012년 3월 6일)