철도차량용 영구자석 동기전동기의 열해석 기법 연구

Investigation of a Thermal Analysis Method for IPMSM in Railway Vehicles

박찬배* · 이형우 · 이병송

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

Abstract In this paper, research on the thermal analysis method is reported for the characterization of heat generation while operating an Interior Permanent Magnet Synchronous Motor (IPMSM) for railway vehicles. Efficient cooling of the heat generated in the IPMSM is important because the excessive heat generated from the winding, core and permanent magnets increases the difficulty of continuously operating an IPMSM over long time periods. Therefore, in this study, in order to analyze the heat generation characteristics of the IPMSM for advanced research in the application of IPMSMs to cooling devices, the heat transfer coefficients for each component of the IPMSM were derived and the thermal equivalent circuit was configured to perform thermal analyses. Finally, the validation of the suggested thermal analysis method was performed through comparison with the heat experimental data of an IPMSM prototype.

Keywords : Interior Permanent Magnet Synchronous Motor, Thermal analysis, Thermal equivalent circuit, Permanent magnet

초 록 본 논문에서는 철도차량 추진용 매입형 영구자석 동기전동기(Interior Permanent Magnet Synchronous Motor, IPMSM)의 운전 중 열 발생 특성 분석을 위한 열해석 기법 연구를 수행하였다. IPMSM의 구동 중에 권선, 코어, 영구자석에서 발생하는 과도한 열은 IPMSM의 장시간 연속운전을 어렵게 만들기 때문에, IPMSM에서 발생된 열의 효율적인 냉각이 중요하다. 따라서 본 연구에서는 IPMSM의 냉각장치 적용을 위한 선행 연구로써 IPMSM의 열 발생 특성 분석을 위하여 IPMSM의 각 구성품에 대한 열전달 계수를 도출하고, 열 등가회로를 구성하여 열해석을 수행하는 열해석 기법 연구를 수행하였다. 또한 IPMSM 실 모델의 열 실험 데이터와의 비교를 통한 열해석 기법의 유효성 검증을 수행하였다.

주요어 : 매입형 영구자석 동기전동기, 열해석, 열등가회로, 영구자석

1. 서 론

최근 견인전동기의 경우, 전동기 내부의 온도 분포 및 열적 특성에 대한 관심이 고조되고 있는데, 이는 견인전동기의 고효율, 소형 경량화와 밀접한 관련이 있다. 특히 철도차량의 경우, 견인전동기는 차상 설비로 제작이 되기 때문에 고효율화 및 소형 경량화가 필수적이다.

하지만 견인전동기가 소형 경량화 될수록 같은 손실(열원)에 대하여 방열면적이 줄어들게 되어 견인전동기 내부의 온도가 높아지게 되며, 이로 인한 효율 감소와 견인전동기의 정상 운전을 저해하는 요소로 작용할 수 있다[1-3]. 이와 같은 문제를 해결하기 위해서 견인전동기의 정확한 발열량 해석과 이를 바탕으로 한 열해석이 함께 수행되어야 하며, 이는 견인전동기의 소형 경량화를 통한 고출력밀도화 기술의 안정도를 높이는 데 큰 역할을 할 수 있을 것이다. 최근 철도차량 추진용 견인전동기로 영구자석 동기전동기가 많은 관심을 받고 있는 상황에서 영구자석 동기전동기의 운전 중 권

선, 코어, 영구자석에서 발생하는 과도한 열은 영구자석 동기전동기의 장시간 연속운전을 어렵게 만들며 신뢰성을 영향을 끼치기 때문에, 영구자석 동기전동기의 운전 중 열 발생 메커니즘의 분석 및 발생된 열의 효율적인 냉각이 중요하다. 따라서 본 연구에서는 철도차량 추진용 매입형 영구자석 동기전동기(Interior Permanent Magnet Synchronous Motor, IPMSM)의 별도 냉각장치 적용을 위한 선행 연구로써 IPMSM의 열 발생 특성 분석을 위하여 IPMSM의 각 구성품에 대한 열전달 계수를 도출하고, 열 등가회로를 구성하여 열해석을 수행하는 열해석 기법 연구를 수행하였다. 또한 IPMSM 실 모델의 열 실험 데이터와의 비교를 통한 열해석 기법의 유효성 검증을 수행하였다.

2. IPMSM의 열해석 기법 도출

2.1 전동기의 열해석 기법

흔히 사용되는 전동기의 열해석 방법에는 집중정수법(Lumped parameter method)과 분포정수법(Distributed parameter method)이 있으며, 이 둘을 혼합한 하이브리드법이 있다. 집중정수법은 흔히 열등가회로법(Thermal network method)으로도 알려져 있으며, 이 방법의 장점은 전동기 전

*Corresponding author.
Tel.: +82-31-460-5427, E-mail : cbpark@krii.re.kr
©The Korean Society for Railway 2013
<http://dx.doi.org/10.7782/JKSR.2013.16.2.099>

체가 계산영역이 되기 때문에 전동기의 전반적인 온도분포, 열의 흐름 등을 매우 쉽게 파악할 수 있을 뿐 아니라, 계산 절점의 수나 위치를 자유롭게 선택할 수 있어서 비교적 손쉬운 전처리과정(Pre-processing)을 필요로 한다. 분포정수법의 예로는 유한요소법(FEM)을 들 수 있다. 이 방법은 국부적으로 상세한 온도를 알고자 할 때 유용한 방법으로 열응력(Thermal Stress) 계산 등에 많이 사용된다. 다만, 계산과정의 특수성으로 인하여 복잡한 형상의 3차원 모델을 해석하고자 할 때 많은 시간과 노력이 요구되는 번거로움이 존재한다.

Fig. 1. Concept of IPMSM thermal analysis

본 논문에서는 하이브리드법을 적용하였으며, 집중정수법을 기반으로 전동기의 전반적인 온도 분포 및 열의 흐름 등을 파악하고, 열 등가회로 상의 각 부분에서의 열전달 파라미터 및 손실과 같은 열원 도출 시에는 분포정수법을 이용하는 프로세스를 적용하였다. Fig. 1은 본 논문에서 제안하는 IPMSM의 미소 제어체적을 고려한 3차원 열등가회로망 해석기법의 순서도를 보여주며, IPMSM의 미소 제어체적을 고려한 3차원 열등가회로망을 구성하여 적용하였으며, IPMSM의 고정자와 회전자 코어의 철손 데이터로부터 열등가회로망의 열원을 도출하는 과정에 있어서 철손밀도를 고려하는 개선된 방법을 제시한다.

2.2 IPMSM의 미소 제어체적을 고려한 3차원 열등가회로망법

일반적인 건전전동기의 경우, 냉각용 팬이 전동기의 외함 내부에 축방향으로 설치가 되며, 전동기 코어에 축방향으로 송풍홀을 통한 냉각 공기의 유로가 형성되기 때문에 축방향으로의 냉각 효과에 따른 전동기 각 부분에서의 온도 구배

가 크게 발생될 수도 있는데, 이러한 전동기 모델에 2차원 열등가회로망을 적용하기에는 한계가 있었다. 추가적으로 IPMSM에서 대부분의 열이 발생하는 지점이 손실이 크게 발생하는 코일 및 공극과 접하는 코어 부분임을 감안할 때, 코일 및 공극과 접하는 코어 부분에서의 세분화된 열 분포 특성을 도출하는 것이 중요할 것이다. 따라서, 본 논문에서 제시하는 미소 제어체적을 고려한 3차원 열등가회로망법은 IPMSM의 공극과 접하는 고정자 티스 및 회전자 코어 외각 부분의 제어체적을 세분화하고 각 세분화된 제어체적간의 3차원 방향으로의 열등가회로망을 구성함으로써, 열해석 결과에 영향을 줄 수 있는 다양한 열저항들을 3차원 방향으로 고려하여 좀 더 현실적인 열 특성 결과 및 국부적인 온도 분포 결과를 도출할 수 있다는 장점을 갖고 있다. Fig. 2는 IPMSM의 기존의 2차원 열등가회로망과 미소제어체적을 고려한 3차원 열등가회로망의 비교를 보여준다.

Fig. 2 Three-dimensional thermal equivalent network of IPMSM considering small control volumes

2.3 열해석의 정식화

Fig. 2의 IPMSM 모델의 각 제어체적에서의 열저항과 열용량을 실제 주어진 IPMSM의 치수와 재질에 따른 여러 열상수들로 계산하여 열등가회로망을 구성하고 FEM을 통하여 구해진 손실분포로부터 전기회로적인 해석을 한다. 이와 같은 열등가회로망법을 이용한 IPMSM의 열적 정상상태 특성 및 과도상태 특성 분석법을 설명하기 위한 열등가회로망의 기본 개념을 Fig. 3에 나타내었다. Fig. 3로부터 열등가회로망의 모든 절점에 대해 식 (1)과 같은 식들을 도출하여 식 (2)의 행렬식이 만들어진다[5].

$$C_i \frac{dT_i}{dt} = \frac{1}{R_{ji}} (T_j - T_i) + Q_i \quad (1)$$

$$[C] \frac{d[T]}{dt} = [Y][T] + [Q] \quad (2)$$

여기서, $[C]$ 는 열용량 행렬, $[T]$ 는 열 행렬, $[Y]$ 는 열컨덕턴스 행렬이며 $[Q]$ 는 열손실 행렬이다.

Fig. 3 Basic concept of the thermal equivalent circuit analysis

3. IPMSM의 열해석 및 검증

3.1 IPMSM의 열해석 모델링

본 논문에서는 소용량 추진용 집중권 IPMSM 모델의 열등가회로망을 구성하여 열 특성 분석을 수행하였으며, 실 모델의 열 시험데이터를 통하여 제시된 열등가회로망법의 유효성을 검증하였다. Fig. 4는 5kW급 소용량 추진용 IPMSM을 보여주며, Table 1에 IPMSM의 사양을 정리하였다.

IPMSM 모델의 열해석을 위해서는 먼저 모델의 제어체적을 분할하고, 분할된 제어체적에 근거하여 열등가회로망을 구성해야 한다. Fig. 5는 5kW급 IPMSM의 제어체적 분할 중/횡단면도 및 열등가회로망 중/횡단면도를 보여준다. 다음으로 제어체적에 근거하여 각 매질에서의 열전달계수, 열저항

Fig. 4 IPMSM(5kW class) for small-capacity traction

Table 1 Main specifications of IPMSM(5kW class) for small-capacity traction

Contents	Value	Unit
Rated output power	5	kW
Rated torque	26.3	Nm
Rated speed	1769	rpm
Outside diameter of rotor	165.7	mm
Outside diameter of stator	270	mm
Stack length of core	25	mm
Permanent magnet	Nd	-
Allowable temperature	150	°C

Fig. 5 Control volume segmentation and thermal equivalent circuit for thermal characterization of IPMSM(5kW class)

및 열용량을 계산하여야 한다. 먼저 각 매질에서의 열용량을 도출하기 위하여 Table 2에 각 매질의 비열 및 밀도 데이터를 정리하였다. Table 3에 IPMSM 각 매질에서의 전도 열전달계수와 대류 열전달계수를 계산하여 정리하였다. Table 3에서 보는 바와 같이, 공극에서의 대류 열전달계수는 Gazley의 고정자 슬롯의 치수에 따른 회전방향/축방향 유동을 고려한 실험적 결과를 참조하여 도출하였으며, 그 외의 대류 열전달계수는 자연대류 조건을 적용하여 도출하였다[6]. 또한, IPMSM의 프레임 표면과 외기 사이에는 대류 열전달계수에 추가적으로 복사 열전달계수를 함께 고려하였으며[7], 일반적으로 전동기의 표면온도가 30°C 정도 바뀔 경우 복사 열전달계수의 변화가 ±0.5 정도로 알려져 있다[8]. 다음으로 열원이 되는 열손실 도출을 위하여 IPMSM의 FEM을 이용한 손실 분석을 수행하여야 하며, 5kW급 IPMSM의 정

Table 2 Main material properties for the IPMSM

Properties	Value	Unit
Frame/End cap specific heat	963	J/kg°C
Frame/End cap density	2710	Kg/m³
Lamination steel specific heat	444	J/kg°C
Lamination steel density	7700	Kg/m³
Copper specific heat	381	J/kg°C
Copper density	8978	Kg/m³
Magnet specific heat	190	J/kg°C
Magnet density	7010	Kg/m³
Shaft steel specific heat	480	J/kg°C
Shaft steel density	7978	Kg/m³

Table 3 Main thermal transfer coefficient of 5kW IPMSM in each medium

Component		Thermal transfer coefficient	Unit
Conduction	Frame (AL)	200	W/m ² °C
	Stator/Rotor	25	
	Coil	398	
	Coil Insulation (Nomex)	0.1	
	Magnet	7.6	
	Shaft	50	
Convection	Air-gap	36.15	W/m ² °C
	From frame/stator yoke to inner air	10	
	From stator shoe to inner air	20	
	From end-coil to inner air	15	
	From rotor/magnet/shaft to inner air	20	
Convection + Radiation	From frame to outer air	22	W/m ² °C

Table 4 Loss distributions of IPMSM(5kW class) used as heat sources (rated speed: 1769rpm)

Component		Loss [W]
Stator	Yoke	21.59
	Teeth	25.95
	Shoe	4.43
	Coil	270
Rotor	Outer rotor	3.06
	Bridge	0.42
	Inner rotor	6.57
	Magnet	10.02

격속도에서의 고정자와 회전자 각 부분에서의 철손 해석 결과를 Table 4에 정리하였다.

3.2 IPMSM의 열해석 결과 검증

본 논문에서 제시한 열등가회로법에 의한 IPMSM 모델 열해석 기법의 유효성을 검증하기 위하여 소용량 추진용 5kW 급 집중권 IPMSM 시제품의 온도 상승시험 결과를 이용하였다. 시제품의 온도 측정 포인트는 엔드코일에서 2포인트(U,V상), 코일 센터에서 3포인트(U,V,W상), 프레임 커버에서 1포인트 측정을 실시하였으며, 시험환경은 외기온도가 19°C였다.

Fig. 6(a)는 본 논문에서 제시한 열등가회로법에 의한 IPMSM 모델의 정상상태 열해석 결과를 보여준다. Fig. 6(a)에서 보는 바와 같이, 코일 부분의 온도가 약 141°C로 가장 높으며, 허용온도 150°C를 만족함을 확인할 수 있다. Fig. 6(b)는 5kW급 IPMSM 시제품의 구동 후 100분까지의 열등가회로법에 의한 계산값과 실 온도 상승시험에 의한 시험값의 온도상승 특성을 보여주며, Table 5에 IPMSM 시제품의 구동 후 100분 지점에서 열등가회로법에 의한 계산값과 실 온도 상승시험에 의한 시험값 사이의 정량적 비교 결과

(a) Steady state temperature distribution according to the thermal equivalent circuit method

(b) Transient temperature calculation results vs. test results

Fig. 6 Thermal characteristics of IPMSM according to the thermal equivalent circuit method and thermal test results

를 정리하였다. IPMSM의 각 구성품을 등가 열저항으로 환산하여 계산한 열등가회로법의 특성상 약간의 오차는 불가피하다. Table 4에서 보는 바와 같이, IPMSM의 프레임 커버에서는 해석 결과와 시험 결과 사이에 약 3°C의 온도 차

Table 5 Temperature comparison between the calculation results and thermal test results by the operation of 5kW-class IPMSM (100 minutes operation)

Component	Test value [°C]	Calculation value		
		Temperature [°C]	Difference [°C]	Error rate [%]
End Coil 1/2	137.0 (Ave.)	136.0	1	0.73
Coil 1/2/3	133.4 (Ave.)	135.8	2.4	1.80
Frame Cover	85.7	88.7	3	3.50

이가 발생하였으며, 코일과 엔드코일 부분에서는 약 3°C의 미만의 온도 차이가 발생하였다. 결과적으로 프레임 커버에서는 해석 결과와 시험 결과 사이에 오차가 약 3.5% 정도 발생하였으며, 코일과 엔드코일 부분에서는 약 2% 미만 정도 발생하였다. 전반적으로 본 논문에서 제시한 열 등가회로법에 의한 IPMSM의 열 특성 분석법에 대한 유효성이 어느 정도 확보되었다고 볼 수 있다.

4. 결 론

본 논문에서는 철도차량 추진용 매입형 영구자석 동기전동기의 운전 중 열 발생 특성 분석을 위한 열해석 기법 연구를 수행하였다. IPMSM의 냉각장치 적용을 위한 선행 연구로써 IPMSM의 열 발생 특성 분석을 위하여 IPMSM의 각 구성품에 대한 열전달 계수, 열저항 및 열용량을 도출하고, 열원이 되는 열손실 도출을 위하여 IPMSM의 FEM을 이용한 손실 분석을 수행하고, 열 등가회로를 구성하여 열 특성을 분석하는 열해석 기법 연구를 수행하였으며, 소용량 추진용 5kW급 IPMSM 시제품의 온도상승시험 결과와의 비교를 통한 제안 기법의 유효성 검증을 수행하였다. 결과적으로 코일과 엔드코일 부분에서는 해석 결과와 시험 결과 사이에 약 5~8°C(3.6~6%)의 온도 차이가 발생하였으며, 전반적으로 본 논문에서 제시한 열 등가회로법에 의한 IPMSM의 열해석 기법에 대한 유효성이 어느 정도 확보되었다고 볼 수 있겠다.

향후 본 연구를 통하여 확보된 열해석 기법을 통하여 대용량급의 철도차량 추진용 매입형 영구자석 동기전동기의 냉각장치 적용 연구에 활용이 가능할 것으로 보인다.

참고문헌

- [1] C.B Park, H.W. Lee, B. S. Lee (2012) A study on the reduction of the stator iron loss on Permanent Magnet Synchronous Motor for light railway transit propulsion system, *Journal of the Korean Society for Railway*, 15(4), pp. 376-380.
- [2] J.W. Lim, J.H. Seo, S.Y. Lee, H.K. Jung (2006) Thermal Net-

work Analysis of Interior Permanent Magnet Machine, 2009 Spring Conference of the Korean Society for Railway, Gyeongju, pp. 527-532.

- [3] S.M. Jang, J.C. Seo, H.W. Cho, Y.H. Jeong (2004) Analysis of thermal distribution for permanent magnet high speed motor, *KIEE Summer Conference 2004*, pp. 1073-1075.
- [4] J.H. Seo (2010) Thermal analysis and optimal design of Interior Permanent Magnet Motor for Vehicle Application, PhD Thesis, Seoul University.
- [5] Y.S. Lee, S.Y. H (1998) Thermal analysis technology of electric motors : Part 1, *Proceedings of KIEE*, 48(9), pp. 12-17.
- [6] C. Gazley, JR. (1958) Heat-transfer characteristics of the rotational and axial flow between concentric cylinders, *Transaction of the ASME*, pp. 79-90.
- [7] K.C. Jang, D.J. Bang, D.H. Kang (1998) Thermal analysis technology of electric motors : Part 2, *Proceedings of KIEE*, 48(9), pp. 25-31.
- [8] Y.S. Lee (1998) Thermal analysis of Induction Motor with Axial Cooling Channels in Stator and Rotor, *PhD Thesis*, Seoul National University.

접수일(2012년 11월 13일), 수정일(2013년 1월 4일),
게재확정일(2013년 3월 4일)

Chan-Bae Park : cbpark@krii.re.kr

Advanced Traction and Noncontact System Research Team, Korea Railroad Research Institute, #176, Cheoldo-bangmulgwan-ro, Uiwang-si, Gyeonggi-do, 437-757, Korea

Hyung-Woo Lee : krhwlee@ut.ac.kr

Department of Railway Vehicle System Engineering, Korea National University of Transportation, 157 Cheoldo-bangmulgwan-ro, Uiwang-si, Gyeonggi-Do, 437-763, Korea

Byung-Song Lee : bslee@krii.re.kr

Advanced Traction and Noncontact System Research Team, Korea Railroad Research Institute, #176, Cheoldo-bangmulgwan-ro, Uiwang-si, Gyeonggi-do, 437-757, Korea