

Thermal Topology Optimization
Based on
Equivalent Thermal Conductivity
in Electric Motor

May 2024

Akihiro KATSUNO

報告番号	Ⓐ 乙 第	号	氏 名	勝野 晃弘
主 論 文 題 名 : Thermal Topology Optimization Based on Equivalent Thermal Conductivity in Electric Motor (電動機における等価熱伝導率に基づく熱的トポロジー最適化)				
(内容の要旨) 電動機は様々な産業システムにおいて幅広く利用されている。しかしながら、高トルク密度を実現するための電磁界解析、熱解析による構造最適設計は未だ達成できていない。電動機の高トルク密度化を実現するために、巻線のピーク温度を下げる冷却設計が不可欠である。特に、冷却性能と製造性の観点から、スロット内に伝熱媒体を挿入する構造は有力な冷却方法の一つである。そこで本研究では、巻線のピーク温度を最小化するような熱伝導体のトポロジー最適化を目的とした。また、トポロジー最適化に用いる巻線の均質化モデルを検証し、均質化モデルにおけるピーク温度の補正手法を提案した。 第1章では、本研究の背景と従来技術の問題点と課題、研究の目的について説明した。 第2章では、密度法に基づくトポロジー最適化の基礎を概説した。 第3章では、2つの材料に関する均質化理論の基礎を示した。巻線の均質化モデルは、トポロジー最適化において離散的なコイル配置を表現するために不可欠である。 第4章では、内部発熱を伴う任意形状の集中定数熱回路 (LPTN: Lumped Parameter Thermal Network) を提案した。さらに拡張として、円柱と三角柱の径方向 LPTN を導出した。重要な発見は、これらの非中空形状の最高温度が各 LPTN の節点電圧で表されることである。また、コイルを囲む絶縁体の形状を模してシミュレーションを行い、開発した LPTN が従来の LPTN による近似よりも高精度であることが示された。 第5章では、第3章で示した均質化モデルのピーク温度を巻線のピーク温度に補正する方法を提案した。等価熱伝導率を用いて計算される最高温度は、均質化された巻線の温度である。したがって、コイルの最高温度は均質化モデルの温度から補正して求める必要がある。補正モデルは、第4章で開発した LPTN に基づいて構築される。さらに、均質化モデルの応用として電動機ステータを簡易的な LPTN でモデル化し、電気抵抗の温度依存性を反映した、巻線ピーク温度の解析式を導出し、その有用性をシミュレーションにより示した。 第6章では、モータスロットのトポロジー最適化手法を提案した。最適化問題を数学的に記述し、SIMP (Solid Isotropic Material with Penalization) 法と均質化法に基づいて、占有率に依存する巻線の発熱率と熱伝導率を定式化した。コイルとワニスおよび熱伝導体という複雑な3材料最適化問題は、均質化理論を導入することにより単純な2材料最適化問題に帰着する。シミュレーションの結果、発熱率と放熱性のトレードオフの下で、体積制限を設けることなく熱伝導体の最適解が得られた。最適化された形状により、ピーク温度は従来のシンプルなアルミ板と比較して8.84%低減された。 第7章で、本研究全体の成果をまとめた。				

Thesis Abstract

No. _____

Registration Number	☒ "KOU" ☐ "OTSU" No. _____ *Office use only	Name	KATSUNO, Akihiro
Thesis Title Thermal Topology Optimization Based on Equivalent Thermal Conductivity in Electric Motor			
Thesis Summary A cooling design of windings that reduces the maximum temperature is essential for high torque density. Many cooling methods have been developed, and in terms of cooling performance and manufacturing feasibility, the structure in which an aluminum plate is inserted as a heat path inside a slot is one of the compelling methods. Therefore, this research aims to optimize the topology of the heat path to minimize the peak temperature. In addition, the homogenization model used for the topology optimization (TO) is validated, and a correction theory for peak temperature is developed. Chapter 1 summarized the background and previous studies. Chapter 2 described the fundamentals of TO based on the density method. Chapter 3 introduced the fundamental theories of homogenization for two materials. In chapter 4, a lumped parameter thermal network (LPTN) of arbitrary shape with internal heat generation was developed. Furthermore, the LPTNs of non-hollow cylinder and triangular prism were derived. The critical finding was that a node of the LPTN represents the maximum temperature for these non-hollow shapes. Simulations were conducted for the shape of an insulator surrounding a coil, and the results showed that the developed LPTN was more accurate than the conventional LPTN. Chapter 5 developed a method to correct the peak temperature in the homogenization model to that of the windings. The maximum temperature calculated using equivalent thermal conductivity is the temperature of the homogeneous material. Therefore, the temperature of the homogeneous material must be corrected to represent the coil temperature. The correction model was derived from the developed LPTNs. Furthermore, a simple homogenized stator was modeled with a macro-LPTN, and an analytical expression for the maximum coil temperature, including the local temperature dependence of the electrical resistance, was derived. Chapter 6 developed a TO method for motor slots. The TO problem was mathematically described, and the thermal conductivity and the occupancy-dependent heating rate were formulated based on the SIMP and homogenization methods. The complex three-material TO was simplified into the simple two-material TO by introducing the homogeneous windings. As a result of simulations, an optimal solution was obtained without a weight limitation under the trade-off between heat generation rate and heat conduction efficiency. The peak temperature was reduced by 8.84% with the optimized heat path compared to the conventional simple aluminum plate. Chapter 7 concluded the whole dissertation.			