

エサキムトゥ パンダラコン シリナータン

| | |
|---------|---|
| 氏名 | ESAKIMUTHU PANDARAKONE SHRINATHAN |
| 学位の種類 | 博士（工学） |
| 学位記番号 | 博第1148号 |
| 学位授与の日付 | 平成31年3月27日 |
| 学位授与の条件 | 学位規則第4条第1項該当 課程博士 |
| 学位論文題目 | Investigation on High Performance Diagnosis Method of Induction Motor Fault using Machine Learning and Artificial Neural Network (機械学習および人工知能を用いた誘導電動機の故障診断法の高性能化に関する研究) |
| 論文審査委員 | 主査 教授 水野 幸男 教授 竹下 隆晴 教授 小坂 卓 教授 穂積 直裕 (豊橋技術科学大学) |

論文内容の要旨

産業用電動機は基幹動力源として様々な分野で用いられており、その故障は多大な経済的損失をもたらす。各種プラントでは高経年の電動機が多数稼動しているが、近年のコスト削減の見地から保守・点検が十分に行われてはいない。一方、民生用にも膨大な数の電動機が使用されており、利用者の安全確保が必要不可欠である。電動機には高信頼性が要求される一方で、故障診断技術や余寿命推定技術確立が社会的に切望されている。

このような状況に鑑み、本論文では誘導電動機の固定子巻線短絡、回転子バー折損およびベアリング故障を対象とし、従来手法では困難であった軽微な故障の検出手法を提案している。測定が容易な負荷電流の周波数スペクトルから特徴量を抽出し、二次元表示することにより特徴量分布を可視化するとともに、機械学習あるいは人工知能などの援用により特徴量分布の重なりの問題を解決して高い診断正解率を達成している。

本論文はこれらの成果を取りまとめたものであり、9章で構成される。各章の概要は以下の通りである。

第1章では、本研究の背景および目的を述べている。これまでに提案されている故障診断法の概要および問題点をまとめ、本研究の意義を明確にしている。

第 2 章では、固定子巻線短絡の診断法を提案している。負荷電流の周波数スペクトルの特有周波数成分を特徴量とすることにより、巻線の 2 ターン以上の短絡診断ができることを示した。この診断手法における周波数成分の組み合わせの問題を解決するため、新たに特定周波数成分に着目したひずみ率の導入により、最も軽微な 1 ターン短絡の検出を可能にしている。

第 3 章では回転子バー折損を検出するために、負荷電流の周波数スペクトルの特定周波数成分の振幅を特徴量とすることを提案している。折損本数と特徴量との関係に基づく二段階診断法とクラスタリング（自己組織化マップ）により 1 本折損の検出を可能にするるとともに、1~4 本折損の識別もできることを示している。

第 4 章ではベアリング外輪に導入した欠陥（穴）を検出する手法を検討している。負荷電流スペクトルの 30Hz および 90Hz 成分の振幅を特徴量として二次元表示することにより、特徴量分布に基づく視覚的な故障診断手法を提案している。回転数が変動すると特徴量の分布領域が重なる問題が生じるが、機械学習法（サポートベクターマシーン：SVM）を用いてこれを解決することにより、直径 0.5mm と軽微な欠陥の検出を可能としている。さらに、穴の大きさ、数、位置による違いもほぼ認識できることを明らかにしている。

第 5 章では、ベアリング故障として外輪に導入した欠陥（切り傷）を対象として、4 章で提案した診断手法により長さ 5mm の切り傷の検出を可能にしている。さらに、切り傷の長さ、向きおよび本数による特徴量の違いの識別ができることから、故障進展追跡の可能性を示している。

第 6 章では、ベアリングに異なる 2 つの欠陥（穴 1 個と切り傷 1 本）がある場合を想定し、穴 2 個、傷 2 本の場合における特徴量の比較しつつ、4 章で提案した手法により診断が可能であることを示している。

第 7 章では、4 章で提案した診断手法が、ベアリングの欠陥のみならず固定子巻線短絡や回転子バー折損検出にも有効であることを示している。さらに、異種類の欠陥が同時に存在する場合の例として、回転子バー折損とベアリングの欠陥（穴または傷）を同時に導入した電動機を用いて検討を行い、提案診断手法の汎用性を確認している。

第 8 章では、前章までの SVM に加え、Naive Bayes 理論など 4 種類の機械学習法および人工知能を用いて、ベアリング外輪の軽微な切り傷、穴、擦り傷を対象とした診断を実施している。4 章で提案した特徴量に対していずれの診断手法を適用しても実用的に許容できる診断正解率が得られることを示し、提案した特徴量が妥当であることを明らかにしている。SVM に比べて人工知能を用いる方が高い診断正解率が得られることを示し、その理由を考察している。また、故障診断における各手法の使い分けについても議論している。

第 9 章では、本研究で得られた知見と今後の課題をまとめている。

論文審査結果の要旨

誘導電動機は基幹動力源として様々な分野で用いられており、その故障は多大な経済的損失をもたらす。各種プラントでは高経年の電動機が多数稼動しているが、近年のコスト削減の見地から保守・点検が十分には行われていない。一方、民生用にも膨大な数の電動機が使用されており、安全確保が必要不可欠である。電動機には高信頼性が要求される一方で、故障診断技術や余寿命推定技術確立が社会的に切望されている。

このような状況に鑑み、本論文は、誘導電動機の固定子巻線短絡、回転子バー折損およびベアリング故障を対象とし、従来困難とされた軽微故障検出を可能にする手法を提案し有効性を評価した結果を取りまとめている。

本論文は、9章で構成される。

第1章では、誘導電動機の故障実態と従来の故障診断法の概要をまとめ、本研究の目的を明確にしている。

第2章では、固定子巻線短絡診断法を提案している。負荷電流の周波数スペクトルの特定周波数成分を特徴量とすることにより巻線の2ターン以上の短絡診断を、さらに、特定周波数成分に着目したひずみ率の導入により最も軽微な1ターン短絡の検出をそれぞれ可能にしている。

第3章では回転子バー折損診断法を検討している。負荷電流の周波数スペクトルの特定周波数成分の振幅を特徴量として、折損本数と特徴量との関係に基づく二段階診断法とクラスタリングにより、最も軽微な1本折損の診断を可能にするとともに1~4本折損の状態識別もできることを示している。

第4章ではベアリング外輪に導入した欠陥（穴）を検出するために、負荷電流スペクトルの30Hzおよび90Hz成分の振幅を特徴量として二次元表示し、その分布領域に基づく故障診断法を提案している。工場などの現場では回転数変動するため特徴量の分布領域が重なる問題が生じるが、サポートベクターマシーン（SVM）を援用して解決し、直径0.5mmの軽微な欠陥の診断を可能としている。さらに、穴の大きさ、数、位置による違いもほぼ識別できることを明らかにしている。

第5章では、ベアリング故障として外輪に導入した欠陥（切り傷）を対象として、4章で提案する診断法により長さ5mmの切り傷の診断ができることを示している。さらに、切り傷の長さ、向きおよび本数の違いの識別ができること明らかにし、故障進展追跡の可能性を示している。

第6章では、ベアリングの異なる2つの欠陥（穴1個と切り傷1本）を想定し、穴2個、傷2本の場合と比較しつつ、4章で提案する診断法の有効性を示している。

第7章では、固定子巻線短絡および回転子バー折損の診断にも4章で提案する診断法が適用できることを示し、汎用性を確認している。さらに、異種欠陥が同時に存在する場合の例として、回転子バー折損とベアリングの欠陥（穴または傷）を導入した場合について、提案法の有効性を確認している。

第8章では、前章までのSVMに加え、Naive Bayes理論など4種類の機械学習法および人工知能を用いて、ベアリング外輪の軽微な傷を対象とした診断結果を比較・検討している。いずれの診断手法を適用しても実用的に許容できる診断正解率が得られることを示し、特徴量の妥当性を明らかにしている。また、人工知能を用いると最も高い診断正解率が得られることを示し、その理由を考察するとともに診断法の使い分けについても議論している。

第9章では、本研究で得られた知見と今後の課題をまとめている。

誘導電動機の負荷電流解析により抽出した特徴量に基づき、機械学習あるいは人工知能を用いて、従来法では困難であった軽微故障の高精度診断を可能にしている。簡易かつ経験不要の提案法は現場適用性も高く、誘導電動機の保守管理の省力化や低コスト化への大きな貢献が期待できる。よって、本論文は博士（工学）の学位論文として十分に価値を有するものと認める。