

令和 2 年 5 月 27 日現在

機関番号：17201

研究種目：基盤研究(C)（一般）

研究期間：2017～2019

課題番号：17K06304

研究課題名（和文）異常渦電流損とマイナーヒステリシス特性を考慮した積層鉄芯の鉄損解析法の開発

研究課題名（英文）Iron loss analysis method considering anomalous eddy current loss and minor hysteresis

研究代表者

高 炎輝（Gao, Yanhui）

佐賀大学・理工学部・助教

研究者番号：40586286

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 3,600,000円

研究成果の概要（和文）：本研究では、高効率な電気機器の開発・設計に用いられる磁界解析の鉄損計算の高度化・高精度化を図るため、鉄損の中の発生要因まだ解明されていない電磁鋼板の異常渦電流損について、発生要因を鋼中析出物及び表面の粗さ（凹凸）などによるものと仮定し、それらの物理的現象を考慮する数値的なモデリング方法を提案した。また、開発した異常渦電流損モデリング方法とヒステリシス磁気特性を考慮する方法を実機の鉄損計算に適用し、提案したモデリング手法の有用性を確認した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

現在、国内外における異常渦電流損を考慮した鉄損のモデリング方法としては、異常渦電流損の増加分を導電率大きくして考慮する数値的なモデリング方法と異常渦電流損が鋼板中の平均磁束密度の時間的変化の1.5乗に比例すると仮定した近似式により考慮する方法が、一般によく用いられている。しかしながら、これら数値的なモデリング方法では、実際の鋼板の磁区構造を考慮されていないため、あらゆる周波数と磁束密度に適用することが困難であり、鋼板の磁区構造を考慮する物理的なモデリング方法が必要となる。

研究成果の概要（英文）：To improve the accuracy of the numerical iron loss calculation method used for development and design of high-efficiency electric machines, the generation of anomalous eddy current losses, which is still ambiguous, is assumed due to the steel precipitates and surface roughness, etc. The numerical modeling methods for these physical phenomena and the hysteresis modeling method are proposed and applied to the iron loss calculation of real electric machines for verification.

研究分野：電気機器

キーワード：電磁鋼板 磁界解析 異常渦電流損 鉄損

様式 C - 19、F - 19 - 1、Z - 19 (共通)

1. 研究開始当初の背景

(1) 近年、CO₂削減の観点から電気機器の高効率化への要求が高まっている。一方、機器の駆動用にインバータ電源が盛んに用いられているが、この電源に含まれる高調波成分により、機器の鉄芯で発生する鉄損が増加するため、今後、電気機器をさらに高効率化するため、高調波成分による鉄損増加を精度良く評価できる解析法を確立し、その低減方法を検討する必要がある。

(2) 平成 20 年度に、研究代表者の高が、積層鉄芯の層間ギャップと鋼板中の渦電流を考慮した磁界解析法を用いた鉄損計算法を開発し、インバータ電源に接続された無方向性電磁鋼板を用いたリアクトルに適用し、積層鉄芯中の磁束の偏りが鉄損増加の要因であることを明らかにするとともに、磁束を均一にする改良型リアクトルを提案し、その試作実験を行った結果、鉄損が従来型の約半分に低減できたが、この鉄損解析では、磁壁移動によって生じる異常渦電流損を考慮しなかったため、解析と実測の鉄損値が大幅に異なった。そこで異常渦電流損の考慮が重要であることをわかった。

(3) 電気機器の駆動用電源として電流波形を自由に制御できるインバータ電源が盛んに用いられているが、この電源では電流波形にキャリア周波数に起因する高調波成分が含まれ、この電流の高調波成分によって生じるマイナーヒステリシス損まで考慮した損失解析法を開発する必要がある。

2. 研究の目的

本研究では、インバータ電源に接続された機器の鉄損解析の高精度化を目的とし、申請者らが開発した「鋼板中の渦電流を考慮した積層鉄芯の鉄損解析法」に、異常渦電流損とヒステリシス磁気特性のモデリング手法を導入し、精度良く鉄損が評価できる汎用的な鉄損解析法を開発する。

3. 研究の方法

(1) 磁壁のポウイングを考慮した物理的な異常渦電流損のモデリング手法の開発

磁区幅が小さい無方向性電磁鋼板の異常渦電流損の発生要因が、ピンニングによる磁壁のポウイングによるものと仮定し、既に関済済みの電磁鋼板一枚の二次元渦電流解析による異常渦電流損のモデリング手法に、ポウイング現象を導入する。

(2) マイナーヒステリシス曲線のモデリング手法の開発

Play モデルを用いた磁気特性のマイナーループのモデリング手法を磁界解析に実装する。

(3) 鋼板中の渦電流を考慮した積層鉄芯の鉄損解析法への実装

開発した異常渦電流損とマイナーヒステリシス曲線のモデリング手法を申請者らが開発済みの「鋼板中の渦電流を考慮した積層鉄芯の鉄損解析法」に実装する。

(4) 無方向性電磁鋼板を用いたインバータ電源用リアクトルの鉄損解析

上記で開発した新しい鉄損解析法をインバータ電源下で用いられる無方向性電磁鋼板を用いた従来型リアクトルに適用し、得られた鉄損値を、既に測定済みの鉄損値と比較することにより、本手法の妥当性を検討する。

4. 研究成果

(1) 平成 29 年度は、磁区幅が小さい無方向性電磁鋼板の異常渦電流損を説明するため、無方向性電磁鋼板の異常渦電流損の発生要因が、電磁鋼板の鋼中析出物及び表面の粗さ(凹凸)のピンニング効果による磁壁のポウイング(歪む)によるものと仮定して、ピンニング効果による磁壁のポウイングを考慮した非線形渦電流解析法を提案した。提案した解析手法を各種無方向性電磁鋼板に適用し、鉄損の周波数特性のカタログ値を再現することを試みた。その結果、表面の粗さ(凹凸)により磁壁が歪むとき、鋼板中心に鎖交する磁束が大きくなるため、鋼中全体の渦電流が大きくなり、渦電流損の増加により計算した鉄損値が大きくなり、磁束密度が飽和する高磁束密度以外に、鉄損の周波数特性のカタログ値を全部再現できた(図1)。無方向性電磁鋼板の異常渦電流損の発生要因は表面の粗さ(凹凸)による磁壁の歪みである可能性が示された。また、最大磁束密度と周波数に対して必要なポウイングの湾曲度を表すパラメータの変更無しに鉄損の周波数特性のカタログ値を再現でき、インバータ電源に接続される電気機器にも適用できる可能性を示した。

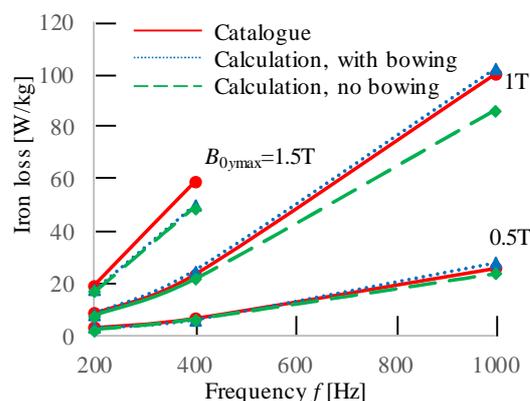


図1 鉄損の比較 (無方向性電磁鋼板)

(2) 平成 30 年度は、まず、平成 29 年度に開発したピンニング効果による磁壁のポウイングを考慮した非線形渦電流解析法を担当者らが開発済みの「鋼板中の渦電流を考慮した積層鉄芯の磁界解析法」に実装し、異常渦電流と鉄芯の積層構造を考慮した磁界解析をインバータ電源用無方向性電磁鋼板を用いたリアクトルに適用した。得られた磁束分布を用いてリアクトルの鉄損を評価した結果、ピンニング効果により鋼板中のヒステリシス損と渦電流損が大きくなり、全体の鉄損値は約 8% を増加した(図 2)。また、磁束密度が飽和する高磁束密度の時の無方向性電磁鋼板の回転ヒステリシス損と渦電流損の簡易モデリング方法を提案した(図 3)。

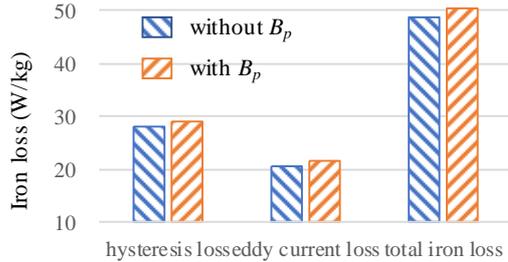


図2 ピンニング考慮となしのリアクトルの各種損失の比較

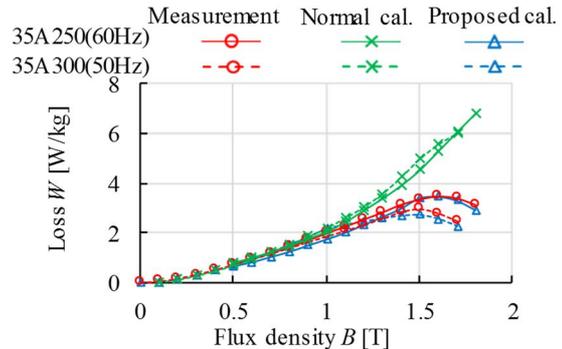


図3 回転鉄損計算値と測定値の比較 (無方向性電磁鋼板)

(3) 令和元年度は、磁区幅が小さい無方向性電磁鋼板の異常渦電流損を説明するため、電磁鋼板の異常渦電流損の発生要因の一つである磁壁移動に伴う異常渦電流損を計算するため、磁区構造を周期的な一次元モデル (Pry and Bean model) と仮定し、現有の 1 次元簡易磁区モデルを三次元数値解析モデルに改良し、磁壁の移動による渦電流損を評価し、古典渦電流損に対する増加割合を検討した。平均的な粒子の大きさと磁区幅を与えて得られた異常渦電流損は、古典渦電流損の約 14% 程度になることがわかった(図 4)。

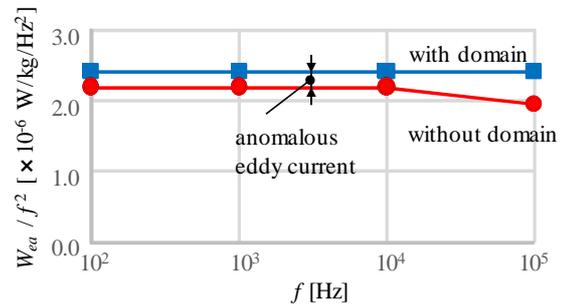


図4 磁区考慮となしの渦電流損の比較 (無方向性電磁鋼板)

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計4件（うち査読付論文 4件/うち国際共著 4件/うちオープンアクセス 0件）

1. 著者名 W. Guan, D. Zhang, Y. Zhu, Y. Gao, K. Muramatsu	4. 巻 54
2. 論文標題 Numerical modeling of iron loss considering laminated structure and excess loss	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 IEEE Transactions on Magnetics	6. 最初と最後の頁 1-4
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1109/TMAG.2018.2850851	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 該当する
1. 著者名 Y. Gao, N. Takeda, H. Dozono, W. Guan, K. Muramatsu, K. Konishi, K. Kanazawa	4. 巻 29
2. 論文標題 Design of a three-phase reactor composed of grain-oriented steel plates for iron loss reduction	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 IEEE Transactions on Applied Superconductivity	6. 最初と最後の頁 1-4
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1109/TASC.2019.2895848	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 該当する
1. 著者名 W. Guan, D. Zhang, M. Yang, Y. Zhu, Y. Gao, K. Muramatsu	4. 巻 29
2. 論文標題 Flux and loss distribution in iron cores with hybrid T-joint	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 IEEE Transactions on Applied Superconductivity	6. 最初と最後の頁 1-4
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1109/TASC.2019.2894947	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 該当する
1. 著者名 Y. Gao, D. Kusano, H. Dozono, K. Muramatsu, W. Guan, C. Tian, J. Yuan, B. Chen	4. 巻 55
2. 論文標題 Simple numerical calculation method of rotational iron loss in silicon steel sheets	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 IEEE Transactions on Magnetics	6. 最初と最後の頁 1-4
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1109/TMAG.2019.2895401	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 該当する

〔学会発表〕 計9件（うち招待講演 0件 / うち国際学会 2件）

1. 発表者名 草野大輔, 高 炎輝, 堂園 浩, 村松和弘
2. 発表標題 飽和領域まで考慮した無方向性電磁鋼板の回転鉄損の簡易計算法
3. 学会等名 電気学会静止器・回転機合同研究会, nos. SA-18-077, RM-18-096, 伊勢市
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 草野大輔, 高 炎輝, 堂園 浩, 村松和弘
2. 発表標題 飽和領域まで考慮した無方向性電磁鋼板の回転ヒステリシス損失の簡易計算法
3. 学会等名 平成30年度（第71回）電気・情報関係学会九州支部連合大会, no. 08-2P-04, 大分大
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Mohendro Kumar Ghosh, Yanhui Gao, Narihiro Takeda, Hiroshi Dozono, Kazuhiro Muramatsu, Weimin Guan
2. 発表標題 Iron loss reduction of three-phase reactor considering anisotropic magnetic Characteristics
3. 学会等名 The 2018 IEEE International Conference on Applied Superconductivity and Electromagnetic Devices (ASEMD 2018), no. 8241, Tianjin, China (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Gao Yanhui, Kusano Daisuke, Dozono Hiroshi, Muramatsu Kazuhiro, Guan Weimin Tian Cuihua, Yuan Jiaxin, Chen Baichao
2. 発表標題 Simple numerical calculation method of rotational iron loss in silicon steel sheets
3. 学会等名 The 18th Biennial IEEE Conference on Electromagnetic Field Computation (IEEE CEFC 2018), no. M02-6, Hangzhou, China (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 市丸修平, 宮部稔久, 高 炎輝, 堂園 浩, 村松和弘
2. 発表標題 異方性鉄芯を用いた三相リアクトルの鉄芯構造が鉄損と騒音に及ぼす影響
3. 学会等名 電気学会静止器・回転機合同研究会, nos. SA-19-008, RM-19-008, 岡山大
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 森賢太郎, 高 炎輝, 堂園 浩, 村松和弘
2. 発表標題 磁界解析を用いたエプスタイン試験器の鉄損測定精度の検討
3. 学会等名 電気学会静止器・回転機合同研究会, nos. SA-19-011, RM-19-011, 岡山大
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 市丸修平, 高 炎輝, 堂園 浩, 村松和弘
2. 発表標題 異方性鉄芯を用いた三相リアクトルの鉄芯構造が鉄損に及ぼす影響
3. 学会等名 平成31年電気学会全国大会, no. 5-133, 北海道科学大学
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 森 賢太郎, 高 炎輝, 堂園 浩, 村松 和弘, 関 偉民, 陳 柏超
2. 発表標題 磁壁の歪みを考慮した電磁鋼板の異常渦電流損モデリング手法の汎用性に関する検討
3. 学会等名 平成29年度(第70回)電気・情報関係学会九州支部連合大会
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 高 炎輝, 森 賢太郎, 村松 和弘, 関 偉民
2. 発表標題 磁壁の歪みを考慮した電磁鋼板の異常渦電流損のモデリング手法
3. 学会等名 日本鉄鋼協会第175回春季講演大会
4. 発表年 2018年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

6. 研究組織

	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
研究 分 担 者	村松 和弘 (Muramatsu Kazuhiro) (30263627)	佐賀大学・理工学部・教授 (17201)	