

科学研究費助成事業（学術研究助成基金助成金）研究成果報告書

平成 25 年 5 月 31 日現在

機関番号：17201

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2011～2012

課題番号：23760264

研究課題名（和文）磁壁移動を考慮した積層鉄芯の異常渦電流損のモデリング手法の開発

研究課題名（英文）Modeling of anomalous eddy current loss in laminated iron core considering domain wall motion

研究代表者

高 炎輝 (Gao Yanhui)

佐賀大学・工学系研究科・助教

研究者番号：40586286

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損失計算の高度化・高精度化を図るため、2011年度は、表皮効果を考慮及び無視した二種類の鉄損の一次元異常渦電流モデリング手法を開発するとともに、無方向性と方向性電磁鋼板に適切な鉄損モデルを明らかにした。2012年度は、前年度に開発した鉄損モデルを実機に適用するため、モデリング手法の改良と機器全体の磁界解析法の開発を行なった。

研究成果の概要（英文）：To improve the iron loss calculation method used for the design of high-efficiency electric machines, in 2011, the one-dimensional loss modeling method considering the anomalous eddy current loss with and without skin effect are developed and the appropriate iron loss model for the non-oriented and oriented materials respectively are clarified. In 2012, to apply the developed iron loss method to real electric machines, the improvement of the iron loss modeling and analysis of electric machines are carried out.

交付決定額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
交付決定額	3,300,000	990,000	4,290,000

研究分野：工学

科研費の分科・細目：電気電子工学・電力工学・電力変換・電気機器

キーワード：電気機器工学 シミュレーション工学 積層鉄芯 異常渦電流 鉄損 磁区

1. 研究開始当初の背景

近年、省エネルギー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、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り電気機器の積層鉄芯で発生する鉄損が増加してしまう問題点も生じている。今後、電気機器のさらなる高効率化を図るためには、電源に含まれる高調波成分による損失増加を評価できる損失解析法を確立する必要がある。

研究代表者は、インバータ電源に接続された電気機器の損失解析法として、積層鉄芯の層間ギャップ、電源に高調波成分が含まれる場合に無視できなくなる鋼板中の渦電流、さらには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とともに、電気機器の一つであるリアクトルに適用した。しかしながら、この損失解析で得られた鉄損の計算値が実測値と大幅に異なってしまい、その理由は、鋼板の磁壁移動で生じる異常渦電流損を無視したためと考えられ、研究代表者が開発した損失解析法をさらに高精度化するためには、異常

渦電流損の考慮が必要であると考えた。

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、上記で示した異常渦電流損の増加分を導電率を大きくして考慮するモデリング方法以外に、異常渦電流損が鋼板中の平均磁束密度の時間的变化の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、実際の磁壁移動によって生じる異常渦電流の物理現象を表現できず、鉄損の実測値と数値的なモデリング方法を用いた検討では限界があり、各種鋼板の磁区構造をモデル化し、磁壁移動による異常渦電流を直接考慮できる物理的なモデリング方法が必要である。

2. 研究の目的

研究の全体構想は、省エネルギーの観点から電気機器のさらなる高効率化を図るため、これら高性能機器の開発・設計に用いられる磁界解析による損失計算を高度化・高精度化することである。その中で本研究では、鋼板の磁区構造をモデル化した磁壁移動による異常渦電流損の物理的なモデリング方法を開発し、磁区構造が異なる各種ケイ素鋼板に適用してモデリング方法の妥当性を検討することにより、磁区構造と鋼板中の表皮効果の関係性を明らかにする。さらに、開発したモデリング方法を電気機器に適用し、その妥当性と有用性を示す。

3. 研究の方法

(1) 異常渦電流損を考慮した鉄損のモデリング手法の開発

鋼板の厚み方向の表皮効果の有無が異なる二種類の異常渦電流損を考慮した鉄損のモデリング手法を開発する。

(2) 素材特性によるケイ素鋼板の鉄損モデルの開発

上記で開発した鉄損のモデリング手法を各種ケイ素鋼板に適用し、鉄損特性のカタログデータと比較することにより、磁区サイズなどのモデリングに必要なパラメータの設定を行うとともに、各種ケイ素鋼板に対する二種類の鉄損モデルの妥当性を検討し、磁区構造と適切なモデリング方法の関係を明らかにする。

(3) ケイ素鋼板の鉄損モデルの妥当性の検証

上記でパラメータなどが最適化された鉄損モデルを各種電磁鋼板に適用し、磁束密度と周波数を変更した鉄損の計算値と実測値(カタログデータ)を比較し、検証する。

(4) モータに適用するための改良

上記で開発した鉄損のモデリング手法では一次元鋼板解析で検討されたが、モータに適用するため、回転磁界が考慮できる三次元鋼板解析に拡張した。

(5) 方向性電磁鋼板に適用するための改良

方向性電磁鋼板を用いた電気機器の損失解析を可能とするため、任意方向の磁気特性を考慮した磁界解析法を開発した。

4. 研究成果

(1) 異常渦電流損を考慮した鉄損のモデリング手法の開発

表皮効果を無視した一次元磁区モデル(Pry and Bean model)と表皮効果を考慮した一次元有限要素モデルによる二種類の鉄損のモデリング方法を開発した。

(2) 素材特性によるケイ素鋼板の鉄損モデルの開発

ケイ素鋼板の材料、磁束密度、および周波数の各条件を変更した場合の最適なモデリング方法について実測値(カタログ値)と比較することにより検討した。

その結果、磁区の大きさが厚みに対して小さい無方向性電磁鋼板では、図1に示すように、表皮効果を考慮し、磁区の大きさに関する渦電流損の修正係数は、磁束密度と周波数には関係なく、材料毎に決定される一定値とすればよいことがわかった。

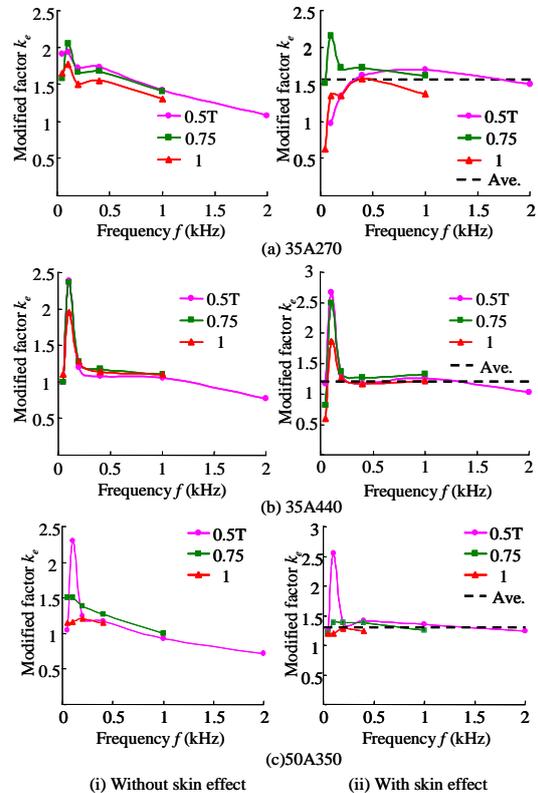


図1 導電率の修正係数 k_e (無方向性)

また、磁区の大きさが厚みに対して大きい方向性電磁鋼板では、図2に示すように、表皮効果を見逃し、修正係数は、磁束密度には関係しないが、材料と周波数で変化させる必要があることが明らかになった。

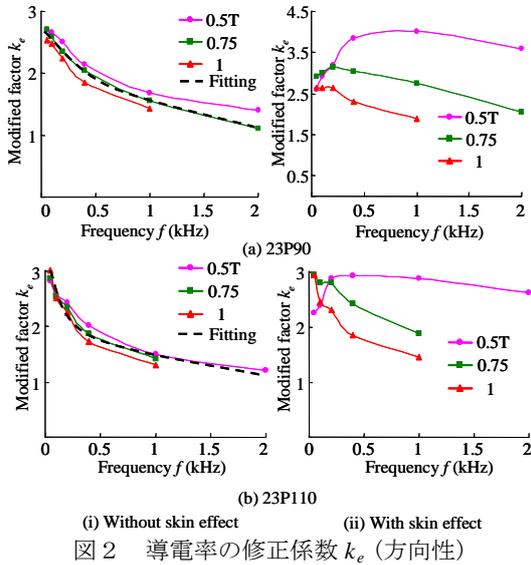


図2 導電率の修正係数 k_e (方向性)

(3) ケイ素鋼板の鉄損モデルの妥当性の検証

上記で開発した鉄損モデルを各種電磁鋼板に適用し、図3及び図4に示すように、磁束密度と周波数を変更した鉄損の計算値は、鉄損の実測値(カタログデータ)をほぼ再現できることを明らかにした。

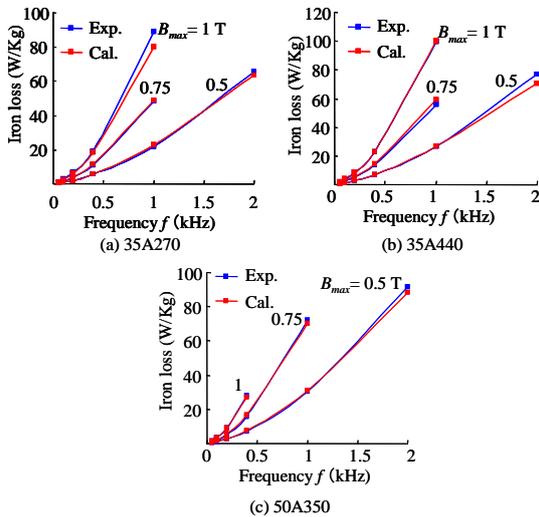


図3 鉄損値の検証(無方向性)

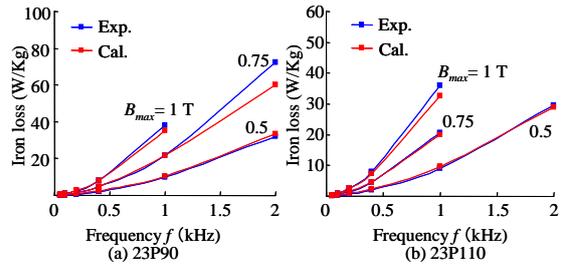


図4 鉄損値の検証(方向性)

(4) モータに適用するための改良

鉄損計算に用いられる鋼板解析を回転磁界が考慮できるように、図5に示す三次元鋼板解析に拡張した。

本解析法の有用性を示すため、図6の簡易積層鋼板に適用し、図7に示すように、渦電流損の精度が従来の一次元鋼板解析に比べて、向上することを示した。

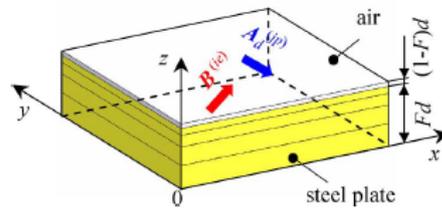


図5 三次元鋼板解析

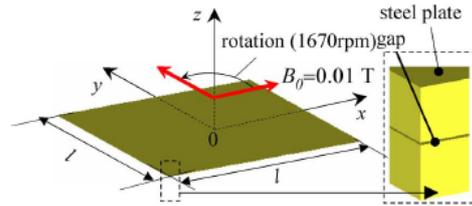


図6 簡易検証用モデル

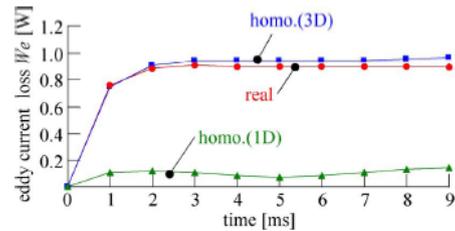


図7 渦電流損の比較

(5) 方向性ケイ素鋼板に適用するための改良

方向性ケイ素鋼板を用いた電気機器の損失解析を可能とするため、任意方向の磁気特性を考慮した磁界解析法を開発し、図8に示す単相リアクトルに適用した。

図9、図10に、それぞれ磁束分布、鉄損分布を示すが、積層構造だけでなく磁気特性の異方性により鉄芯中の磁束に偏りが生じることを明らかにした。

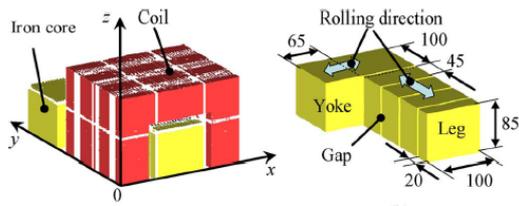


図8 単相リアクトルモデル

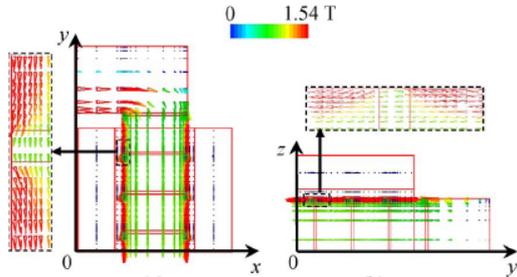


図9 磁束分布

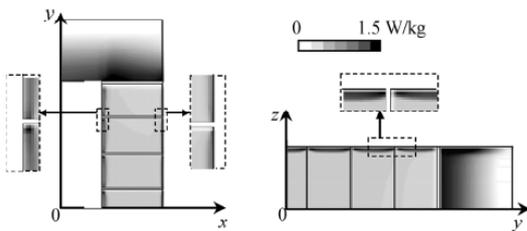


図10 鉄損分布

5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文] (計 3 件)

(1) Yanhui Gao, Daiki Taura, Masahide Nagata, Hiroshi Dozono, Kazuhiro Muramatsu, Kenya Konishi, and Kazunobu Kanazawa, Loss Reduction of Reactor with Grain-oriented Silicon Steel Plates Taking Account of Laminated Structure and Anisotropy, *IEEE Transactions on Magnetics*, 査読有, Vol. 49, 2012, pp. 1973-1976

DOI: 10.1109/TMAG.2013.2245641

(2) Lin Cheng, Shinichi Sudo, Yanhui Gao, Hiroshi Dozono, and Kazuhiro Muramatsu, Homogenization Technique of Laminated Core Taking Account of Eddy Currents in Steel Plates under Rotational Flux, *IEEE Transactions on Magnetics*, 査読有, Vol. 49, 2012, pp. 1969-1972

DOI: 10.1109/TMAG.2013.2245876

(3) Yanhui Gao, Yuhei Matsuo, and Kazuhiro Muramatsu, Investigation on Simple Numeric Modeling of Anomalous Eddy Current Loss in Steel Plate Using Modified Conductivity, *IEEE*

Transactions on Magnetics, 査読有, Vol. 48, 2012, pp. 635-638

DOI: 10.1109/TMAG.2011.2174624

[学会発表] (計 5 件)

(1) Yanhui Gao, Daiki Taura, Masahide Nagata, Hiroshi Dozono, Kazuhiro Muramatsu, Kenya Konishi, and Kazunobu Kanazawa, Loss Reduction of Reactor with Grain-oriented Silicon Steel Plates Taking Account of Laminated Structure and Anisotropy, The 15th Biennial IEEE Conference on Electromagnetic Field Computation (CEFC 2012), no. TP5-21, 2012年11月13日, 大分

(2) Lin Cheng, Shinichi Sudo, Yanhui Gao, Hiroshi Dozono, and Kazuhiro Muramatsu, Homogenization Technique of Laminated Core Taking Account of Eddy Currents in Steel Plates under Rotational Flux, The 15th Biennial IEEE Conference on Electromagnetic Field Computation (CEFC 2012), no. WP2-23, 2012年11月14日, 大分

(3) 長田将秀, 高 炎輝, 堂菌 浩, 村松和弘, Fixed-Point 法を用いた非線形磁界解析の収束性の検討, 第 65 回電気関係学会九州支部連合大会講演論文集, no. 04-2A-16, 2012年9月25日, 長崎大学

(4) Yanhui Gao, Yuhei Matsuo, and Kazuhiro Muramatsu, Investigation on Simple Numeric Modeling of Anomalous Eddy Current Loss in Steel Plate Using Modified Conductivity, The 18th Conference on the Computation of Electromagnetic Fields (COMPUMAG 2011), 2011年7月15日, Sydney (Australia)

(5) 高 炎輝, 松尾優平, 村松和弘, 導電率修正による異常渦電流損の考慮法の各種電磁鋼板への適用, 電気学会静止器・回転機合同研究会, 2011年8月26日, 新潟大学

6. 研究組織

(1) 研究代表者

高 炎輝 (Gao Yanhui)

佐賀大学・工学系研究科・助教

研究者番号: 40586286