

令和 5 年 6 月 12 日現在

機関番号：12501

研究種目：基盤研究(C)（一般）

研究期間：2020～2022

課題番号：20K04411

研究課題名（和文）試作レス設計のための異常渦電流損を考慮したインバータ励磁下の鉄損推定手法の開発

研究課題名（英文）Study of iron loss estimation method for silicon steel sheet under inverter excitation considering anomalous loss for design without prototype

研究代表者

宮城 大輔（Miyagi, Daisuke）

千葉大学・大学院工学研究院・教授

研究者番号：10346413

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 3,400,000円

研究成果の概要（和文）：PWMインバータ励磁下でのモータの鉄損推定法の確立を目指して、無方向性電磁鋼板のマイナーループの推定精度の向上と渦電流損と異常渦電流損の推定手法の検討を行った。無方向性電磁鋼板において、直流偏磁下のヒステリシスループに磁束の過渡現象があることを実験により示し、これが原因でプレイモデルでは高精度なモデリングが出来ないことを示した。さらに、無方向性電磁鋼板においてインバータ励磁下での鉄損測定値とプレイモデルと一次元有限要素法より得られた渦電流損からインバータ励磁下の異常渦電流損を評価し、ある特定の条件のみでの検証ではあるが変調度に依存しないことを示した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

車の電動化が推し進められる中で、回転機の低損失化は極めて重要な研究課題である。交流モータをインバータで励磁すると負荷率が小さいときほど渦電流損の割合が増加することが問題となっており、これを低減するためには異常渦電流損も含めた鉄損推定手法の確立が急務である。そのような中で、インバータ励磁下での新たな異常渦電流損特性を明らかにしたことは、鉄損推定手法の高精度化を前進させ、低損失なモータシステムの構築に貢献することから、カーボンニュートラルを目標としている我が国において、研究成果の社会的意義は大きい。

研究成果の概要（英文）：In order to establish a method for estimating iron loss of motors under PWM inverter excitation, we have improved the estimation accuracy of minor loops and studied estimation methods for eddy current loss and anomalous loss in no-oriented electrical steel sheets. Experiment results showed that there is a flux transient phenomenon in hysteresis loops under DC-biased magnetization in no-oriented electrical steel sheets, and that the Play model cannot model the minor loops with high accuracy because of this phenomenon. Furthermore, the anomalous loss under PWM inverter excitation was evaluated from the measured iron loss and the eddy current loss obtained by the Play model and 1-D finite element method for no-oriented electromagnetic steel sheets, and it was shown to be independent of the modulation level of PWM inverter, although it was verified only under certain conditions.

研究分野：電気機器学

キーワード：鉄損推定 インバータ励磁 ヒステリシス損 渦電流損 異常渦電流損 プレイモデル 有限要素法

## 1. 研究開始当初の背景

地球温暖化対策の一環として、電力消費量の 50%以上を占めているモータの高効率化は必須の課題である。中でも、電気自動車やハイブリッド自動車に用いられているモータの高効率化は、航続距離に直結するため極めて重要な技術開発課題である。また、今後の世界中への電気自動車の普及台数を考えると、高効率化は製品の価値に止まらず地球温暖化対策として極めて重要な技術課題である。電気自動車やハイブリッド自動車には、高トルク運転や広範囲で可変速可能な PWM インバータで駆動する埋込磁石型同期モータ (IPMSM) が多く用いられる。市街地走行時の低速回転・低負荷 (低トルク) の駆動領域では、PWM インバータの変調度が小さくなるためキャリア高調波によって発生する渦電流損が全損失に占める割合が大きく高効率特性に悪影響を及ぼすことが知られているが、電磁鋼板内の異常渦電流損を含めた渦電流損の推定手法が確立されておらず、運転モードも含めた高効率なモータ設計時の大きな問題となっている。

広く用いられている無方向性電磁鋼板の鉄損推定手法は正弦波励磁下の鉄損測定値を利用して推定しているため、高調波を含んだ波形では特に渦電流損の推定誤差により実機の鉄損と乖離する。そのため、近年では、従来法に対し、磁束密度の交流振幅、交流周波数、マイナーループが構成される位置 (直流重畳量) を変えた測定を多数行うことで実測鉄損をテーブル化し、電磁界解析で求めた磁束密度分布から参照する方法が提案されている。この方法では、そもそも渦電流損が磁束密度波形の実効値磁束密度に依存するため、高調波として付与されるマイナーループでの渦電流損のテーブル化が難しいことと、実測値を用いるため大量の測定結果が必要になるため、実用化には大きな壁があるといえる。そこで、プレイモデルなどの直流ヒステリシスループのモデリングと一次元有限要素法を用いて電磁鋼板内の渦電流計算を行う 1D 法の組み合わせにより、任意励磁波形下の鉄損推定が試みられているが、1D 法では異常渦電流損が考慮されていないため、推定精度が満足するものになっておらず異常渦電流損のモデリング手法が実用化への課題となっている。

## 2. 研究の目的

電気自動車に用いられる駆動用の交流モータの鉄損推定精度の向上を目指して、測定により得られた鉄損と一次元有限要素法を用いた渦電流損解析を併用することで、PWM インバータ励磁下での無方向性電磁鋼板の鉄損推定手法について検討を行い、PWM インバータ励磁時の高調波鉄損を含んだ任意励磁波形下の高精度鉄損推定法の開発を目的としている。そのためには、モータの鉄心材料に用いられる無方向性電磁鋼板のヒステリシス損、渦電流損、異常渦電流損のそれぞれの損失特性をモデル化する必要がある。ヒステリシス損はプレイモデルなどの測定値を用いたフィッティング関数を用いた推定手法が提案されているが、現時点では開発途中にありその推定精度など不明な点も多い。渦電流損は 1 次元有限要素法を用いた渦電流解析を行うことで、渦電流による反磁界効果も考慮した渦電流損解析を行うことができる。一方で、異常渦電流損は、その詳細は十分に理解されておらず推定手法が確立されていない。

以上から、PWM インバータ励磁下の鉄損推定手法の高精度化を実現するためには、マイナーループの推定手法の高精度化と異常渦電流損の推定手法の確立が重要となる。ゆえに、各損失の推定手法の検討を行うためには、鉄損を精度良く測定する必要があり、鉄損、ヒステリシス損、渦電流損、異常渦電流損に関して実測し、それぞれの損失特性を検証して PWM インバータ励磁下の鉄損推定手法を検証することを研究目的とした。

## 3. 研究の方法

(1) 異常渦電流損の板厚依存性の測定と評価：フェライトの動的磁気損失はその詳細に関して明確にされていないが、単位体積当たりの動的磁気損失はその形や大きさに依存せず、材料特性、磁束密度の大きさと周波数に依存することが測定結果より報告されている。そこで、電磁鋼板の異常渦電流損がフェライトの動的磁気損失と同様の損失特性を有するかを調べることで、異常渦電流損の推定手法の基礎検討を行う。おおよそ Si 添加量が同材料で厚さが異なる 3 種類の電磁鋼板 (20JNEH1500, 35A360, 50A400) の環状試料により鉄損を測定し、30Hz と 60Hz の測定結果から二周波法によりヒステリシス損と渦電流損を分離したのちに、渦電流損を古典的渦電流損 (理論値) と異常渦電流損を分離して、それぞれの損失の評価を行った。鉄損分離を行うために、試料に励磁する磁束波形が正弦波になるように波形制御を行った。

(2) PWM インバータ励磁下での磁束波形制御システムの構築と PWM インバータ励磁下の高調波が鉄損に及ぼす影響の検討：市販の PWM インバータを用いて、鉄損を測定するための環状試料に励磁すると回路のインピーダンスの影響を大きく受けるため、測定試料や測定回路、さらには測定条件によりマイナーループが含まれたり、磁束波形が歪むことで渦電流損が変化したりと高精度な鉄損測定を行うことが難しい。そこで、任意波形発生器を用いて、PWM 電圧波形で試料に励磁する測定システムの構築を行った。さらに、磁束波形制御を行うことで、低次の高調波成分が除去された磁束波形が励磁されるため、測定結果の渦電流損増加はキャリア周波数に

起因する高次の高調波による渦電流損増加への影響を測定し、検証を行った。キャリア周波数を同じとした周波数の異なる鉄損測定結果より二周波法によりヒステリシス損と渦電流損を求め、それぞれの損失と変調度の関係について調査した。

(3) プレイモデルによるマイナーループの推定精度に関する検討：2 レベルインバータで励磁する場合は、磁束波形にマイナーループが含まれるため、ヒステリシス損も渦電流損も大きく増加すると考えられる。そのため、マイナーループのヒステリシス損推定と渦電流損推定が必要となるが、そのどちらも十分な検討はなされていない。そこで、マイナーループのヒステリシス損推定手法としてプレイモデルに着目し、その推定精度の検証を行った。マイナーループの異常渦電流損を検討するためには、マイナーループの測定結果からヒステリシス損と古典的渦電流損を引くことで求められるため、渦電流解析をするために必要となるマイナーループの形の推定が重要となる。そこで、プレイモデルに必要な準直流的なメジャーロープの測定を行い、プレイモデルを構築し、マイナーループの測定値と推定値との比較を行うことで、プレイモデルによるマイナーループのヒステリシス損の推定精度の検証を行った。

(4) 3 レベル PWM インバータ励磁下における高次高調波が異常渦電流損に及ぼす影響の検討：PWM インバータで励磁する場合に正弦波電圧で励磁する場合に比べて渦電流損が増加することは知られており、本研究課題においても研究成果(2)において測定結果により示している。そこで、研究成果(2)で得られた無方向性電磁鋼板 35A360 の PWM インバータ励磁下の鉄損測定結果と研究成果(3)で得られた無方向性電磁鋼板 35A360 のプレイモデルと一次元有限要素法を用いた渦電流解析により古典的渦電流損を求め、変調度の変化が古典的渦電流損に及ぼす影響について検討を行う。さらに測定結果よりヒステリシス損と有限要素法により求められた古典的渦電流損を引くことで変調度の変化が異常渦電流損に及ぼす影響について検討を行った。

#### 4. 研究成果

(1) 異常渦電流損の板厚依存性の測定と評価：Si 添加量が比較的同じで板厚の異なる 3 種類の無方向性電磁鋼板（20JNEH1500，35A360，50A400）における 60Hz の磁束正弦波励磁時のヒステリシス損，渦電流損，異常渦電流損の測定結果を図 1 に示す。各環状試料の寸法は、内径 60 mm，外径 80 mm とし、20JNEH1500 は 25 枚，35A360 は 15 枚，50A400 は 10 枚を、それぞれ圧延方向を揃えて積層した。また、鉄軸の損失は単位重量あたりの 1 秒間での損失を示す。測定結果より、渦電流損は板厚が厚くなるにつれて増加し、板厚の 2 乗に比例するが、異常渦電流損は板厚にほとんど影響しないことを示唆する測定結果が得られた。つまり、板厚の薄い電磁鋼板は、渦電流損が小さいため異常渦電流損が全損失に占める割合も大きくなり、異常渦電流損係数が大きくなる結果が得られた。すなわち、板厚の薄い材料ほど、異常渦電流損の割合が大きくなるので異常渦電流損を正確に推定する必要がある。また、異常渦電流損は板厚にほとんど依存しない測定結果がえられたことから、異常渦電流損の評価を行う際には、板厚の薄い電磁鋼板で測定を行い、損失推定手法の検討を行うことが有用であるといえる。一方で、板厚の薄い電磁鋼板の方が、ヒステリシス損が小さくなる結果がえられたがこの原因については今後の検討課題である。以上の測定結果から電磁鋼板の異常渦電流損は、板厚に依存せず、古典渦電流損とは別の磁束密度と周波数の大きさに依存した損失であることを示した。

(2) PWM インバータ励磁下での磁束波形制御システムの構築と PWM インバータ励磁下の高調波が鉄損に及ぼす影響の検討：任意波形発生器を用いた疑似的な 3 レベルの PWM インバータで励磁した際の無方向性電磁鋼板 35A360 のヒステリシスループを図 2 に示す。励磁周波数 30 Hz，キャリア周波数 3.0 kHz，変調度は 0.6 とし、磁束波形を正弦波制御したときのヒステリシスループで、マイナーループを作ることなく指令値通りの励磁条件での測定が可能であることを示している。環状試料の寸法は、内径 100 mm，外径 120 mm とし、20 枚を圧延方向を揃えて積層

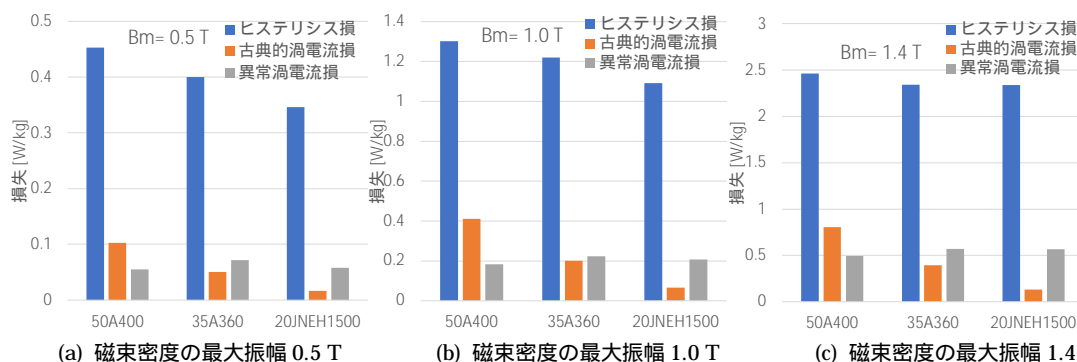


図 1 Si 添加量が比較的同じで板厚の異なる 3 種類の無方向性電磁鋼板（20JNEH1500，35A360，50A400）における 60Hz の磁束正弦波励磁時のヒステリシス損，渦電流損，異常渦電流損の測定結果

した。本測定システムを用いて、最大磁束密度 1.2T で磁束波形正弦波励磁を行ったときの励磁周波数 60Hz でキャリア周波数 2.5kHz としたときと励磁周波数 120Hz でキャリア周波数 2.5kHz としたときの鉄損測定を行い、二周波法によりヒステリシス損と渦電流損に鉄損分離を行った結果を図 3 に示す。インバータ励磁(変調度(m))を 0.5~0.9 に変化)したときと正弦波励磁したときの損失割合を示す。正弦波励磁は渦電流損から解析的に求めた古典的渦電流損を引いて以上渦電流損とした。変調度の大きさに関わらずヒステリシス損が同じ値となったことから、波形制御が行われた高精度な測定結果であるといえる。また、ヒステリシス損は変調度に全く依存しない一方で、渦電流損は変調度が小さくなるにつれて増加する結果が得られた。この増加分はキャリア周波数による高次の高調波による渦電流損の増加であり、古典的渦電流損と異常渦電流損が変調度の変化に対してどのように変化をするのかを調査することがインバータ励磁下の鉄損推定に重要である。

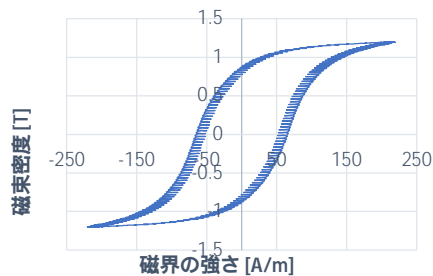


図 2 任意波形発生器を用いた疑似的な 3 レベルの PWM インバータで励磁した際の無方向性電磁鋼板 35A360 のヒステリシスループ(励磁周波数: 30 Hz, キャリア周波数: 3.0 kHz, 変調度: 0.6)

(3) プレイモデルによるマイナーループの推定精度に関する検討: 無方向性電磁鋼板 35A210 の環状試料を用いて、準直流的(励磁周波数 0.02Hz)な励磁により 50mT ~ 1.6T の範囲で 50mT 毎のメジャーリングの測定を行い、プレイモデルを構築した。構築したプレイモデルによるマイナーループの推定精度を検証するために、準直流的な励磁によるマイナーループの測定を行った。その結果、直流偏磁下におけるヒステリシスループ(マイナーループ)に過渡現象があることがわかり、今回の測定では渦電流が発生しないと確認された 0.05Hz で 10 周期にわたり磁界の強さを変化させることで定常状態になることが測定結果より得られた。磁束密度の過渡現象を起こす直流偏磁下におけるヒステリシスループ(1, 5, 10 周目)とプレイモデルによる直流偏磁下におけるヒステリシスループの推定値との比較を図 4 に示す。1 周期目の上側下降曲線上はメジャーリングの軌跡となるため非常に良く一致し、上昇曲線に転じても最初は良く一致しているが、測定値が最初に下降し始めた点よりも小さい磁束密度までしか磁束密度が大きならないために、プレイモデルによる推定値とずれはじめる。そのあとは、同じ磁界の強さの点で、磁束密度が大きくなるためにプレイモデルによる推定値との誤差は大きくなるが、磁束密度入力のために磁界の大きさ入力に比べると誤差を小さくできていることが理解できる。直流偏磁下でのヒステリシスループの測定で生じた磁束密度の過渡現象はメジャーリングの測定では、ほとんど確認されなかった。この現象について、海外の文献などでアコモデーションとして紹介されているが電磁鋼板ではこの現象についてこれまでほとんど議論されてこなかった。この磁束の過渡現象をプレイモデルは表現することが出来ず、マイナーループを推定する際のプレイモデルの不備を明かにした。マイナーループ 1 周目と定常状態になった後(10 周目)のヒステリシス損測定値とプレイモデルによるヒステリシス損推定値との比較を図 5, 6 に示す。定常状態では 5~13% 程度の誤差が生じ、インバータ励磁で生じるマイナーループとなる 1 周目はおおよそ 5% 以内のヒステリシス損推定精度となることを明らかにした。

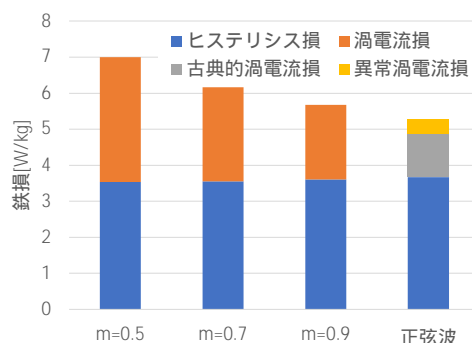


図 3 インバータ励磁下のヒステリシス損と渦電流損の変調度依存性(励磁周波数: 120 Hz, キャリア周波数: 2.5 kHz, 磁束密度振幅: 1.2 T)

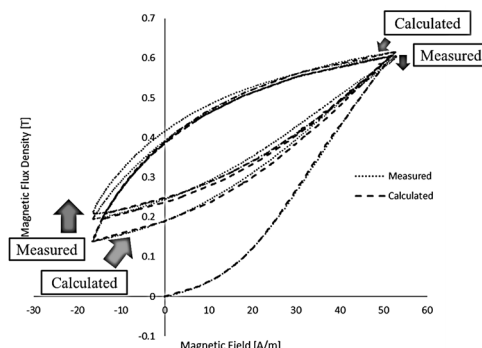


図 4 磁束密度の過渡現象を起こす直流偏磁下におけるヒステリシスループ(1, 5, 10 周目)とプレイモデルによる直流偏磁下におけるヒステリシスループの推定値との比較



(4) 3レベルPWMインバータ励磁下における高次高調波が異常渦電流損に及ぼす影響の検討：研究成果(2)で得られたPWMインバータで励磁した無方向性電磁鋼板35A360の鉄損測定結果とプレイモデルを用いた次元有限要素法により求めた古典的渦電流損から、PWMインバータ励磁下の異常渦電流損について検討を行った。実測した3レベルPWMインバータ励磁条件は、励磁周波数60Hz、キャリア周波数2.5kHzとし磁束密度振幅を0.5Tとしたときに変調度を0.9, 0.7, 0.5と変化させた。変調度が0.7のときのヒステリシスループの実測値と測定により得られた直流ヒステリシスループとプレイモデルと次元有限要素法を用いた計算値によるヒステリシスループを図7に示す。計算値に少しオフセットが乗ってしまいその原因は現在調査中であるが、ヒステリシスループの形は原点に対して対称性のある程度有していることから、計算精度が十分でないことを理解した上で異常渦電流損の評価を行った。鉄損の内訳を表した図を図8に示す。ヒステリシス損はインバータ励磁下で測定したヒステリシスループにマイナーループが含まれていなかったため、準直流で測定したヒステリシス損の値を全ての変調度に致して用いた。変調度が小さくなると高次高調波の影響を受けてプレイモデルと有限要素法により求めた古典的渦電流損は増加する結果となるが、測定結果からヒステリシス損と古典的渦電流損を引いて求めた異常渦電流損は変調度にほとんど依存しない結果が得られた。今回の結果では、計算結果が十分でない可能性が含まれていることと、ある一つの条件のみの検証であるため一般性の有無については更なる検討が必要であるといえる。しかし、図8に示すように異常渦電流損が変調度に依存しない値となることは偶然とも言い切れず、仮に一定となるとすれば、3レベルPWMインバータ励磁下での渦電流損は、プレイモデルと次元有限要素法を用いることで推定出来ることを示したと言える。以上の得られた成果を確固たるものにするためにも更なる研究調査が必要である。

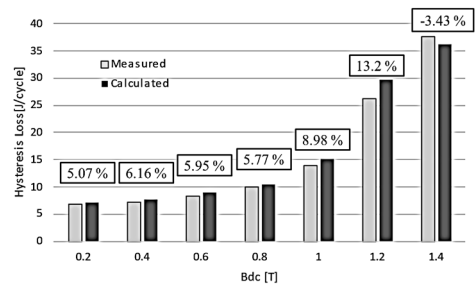


図5 定常状態におけるヒステリシス損の測定値と推定値の比較

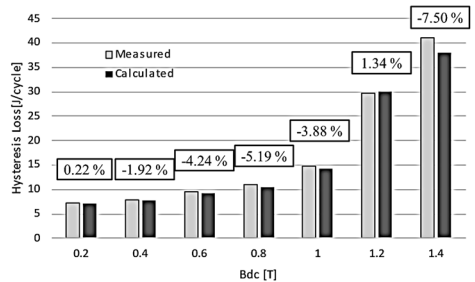


図6 1周期目におけるヒステリシス損の測定値と推定値の比較

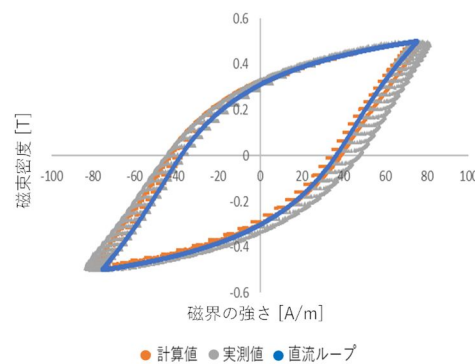


図7 3レベルPWMインバータで磁束波形が正弦波になるように励磁した際のヒステリシスループの実測値と準直流ヒステリシスループの測定値とプレイモデルと次元有限要素法により求めたヒステリシスループ(励磁周波数:60Hz,キャリア周波数:2.5kHz,変調度:0.7)

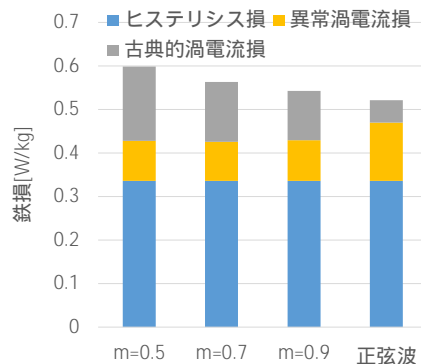


図8 3レベルPWMインバータで磁束波形が正弦波になるように励磁した際のヒステリシス損,古典的渦電流損,異常渦電流損(励磁周波数:60Hz,キャリア周波数:2.5kHz,変調度:0.5,0.7,0.9)

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計0件

〔学会発表〕 計1件（うち招待講演 0件 / うち国際学会 0件）

1. 発表者名 箕輪真弥, 小林宏泰, 早乙女英夫, 宮城大輔
2. 発表標題 プレイモデルによる無方向性電磁鋼板のマイナーループ推定精度に関する検討
3. 学会等名 電気学会研究会（静止器 / 回転機合同研究会）, SA-23-013 / RM-23-013
4. 発表年 2023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
---------------------------	-----------------------	----

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8. 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関
---------	---------