

博士学位論文審査要旨

2017年1月10日

論文題目：ヒステリシス特性を考慮した有限要素磁界解析の実用化に関する研究

学位申請者：北尾 純士

審査委員：

主査：同志社大学大学院理工学研究科 教授 藤原 耕二

副査：同志社大学大学院理工学研究科 教授 長岡 直人

副査：北海道大学大学院情報科学研究科 教授 五十嵐 一

要 旨：

計算機の性能向上とシミュレーション技術の発展により、電気機器の磁気設計に有限要素法を用いた磁界解析が広く活用されている。近年では、さらなる省エネルギー化が切望されており、高効率な電気機器の設計を行うためには、磁界解析における鉄損算出精度の向上が必要不可欠である。現状の磁界解析では、磁性材料の初磁化曲線のみを考慮し、鉄損は後処理で評価する手法が一般的に用いられているが、鉄損評価の高精度化のためには磁気ヒステリシス特性を直接的に考慮することが望ましい。

そこで、本論文では、各種のヒステリシスモデル中で、ヒステリシス現象の再現精度が良好でかつ計算コストも低く、認知度が高いプライザッハモデルと比較して同等以上のモデリング性能を有し、かつ記述がより簡単であるという特徴を有するプレイモデルに着目し、ヒステリシス特性を考慮した磁界解析の実用化手法を提案している。

第1章では、本研究の背景と目的について述べている。

第2章では、本研究で用いるプレイモデルの原理・特徴について説明している。

第3章では、プレイモデルの同定データとして必要な直流ヒステリシス特性の推定方法を提案している。

第4章では、ヒステリシス特性を考慮した定常現象解析のための簡易 TP-EEC 法を提案している。

第5章では、ヒステリシス特性を考慮した積層鉄心の均質化法を提案している。

第6章では、本研究で得られた知見を総括している。

本論文は、鉄損算出精度向上を目的としたヒステリシスモデルの精度改善、解析時間低減等に関する手法を提案し、ヒステリシス特性を考慮した磁界解析の実用化に寄与するところ大である。

よって、本論文は、博士（工学）（同志社大学）の学位論文として十分な価値を有するものと認められる。

総合試験結果の要旨

2017年1月10日

論文題目：ヒステリシス特性を考慮した有限要素磁界解析の実用化に関する研究

学位申請者：北尾 純士

審査委員：

主査：同志社大学大学院理工学研究科 教授 藤原 耕二

副査：同志社大学大学院理工学研究科 教授 長岡 直人

副査：北海道大学大学院情報科学研究科 教授 五十嵐 一

要 旨：

本論文提出者は、本学大学院工学研究科電気電子工学専攻博士課程（前期課程）を2013年3月に修了後、三菱電機（株）に入社し、2014年4月に博士課程（後期課程）に入学して、現在、3年生である。

本論文の主たる内容は、「IEEE Transaction on Magnetics」（2012/11, 2014/2）および「International Journal of Applied Electromagnetics and Mechanics」（2016/8）に掲載されている。さらに、「電気学会論文誌」（2017/3）に掲載されることが決定しており、既に十分な評価を受けている。2016年12月24日午後1時30分より約2時間に亘って学術講演会が開催され、種々の質疑討論が行われたが、提出者の説明によって、いずれについても十分な理解が得られた。講演会終了後、審査委員により、論文に関係する諸問題について口頭試問を実施した結果、論文提出者の十分な学力を確認することができた。なお、英語については、国際会議に筆頭著者として3件の論文を提出し、自ら英語で発表を行っていることに加えて、語学試験にも合格していることから、十分な語学力を有するものと認められる。以上、論文提出者の専門分野における学力および語学力は、十分であると判断できる。よって、総合試験の結果は、合格であると認められる。

博士學位論文要旨

論文題目： ヒステリシス特性を考慮した有限要素磁界解析の実用化に関する研究
氏名： 北尾 純士

要 旨：

計算機の性能向上とシミュレーション技術の発展により、モータや変圧器等の電気機器の磁気設計に有限要素法を用いた磁界解析が広く活用されている。しかし、近年の環境問題を背景として、電気機器のさらなる省エネルギー化が望まれており、高効率な電気機器の設計を行うためには、磁界解析における鉄損算出精度の向上が必要不可欠である。

現状の磁界解析では、磁性材料の初磁化曲線のみを考慮し、鉄損は後処理で評価する手法が一般的に用いられているが、鉄損評価の高精度化のためには磁気ヒステリシス特性を直接的に考慮することが望ましい。そのような観点から、磁気ヒステリシス特性のモデル化に関して、プライザツハモデル、Chua モデル、Jiles-Atherton モデル、プレイモデル、ストップモデル、E&S モデル、ASP モデル、マイクロマグネティックスに基づく手法等の様々なヒステリシスモデルが提案されている。ヒステリシスモデルは古くから研究されているが、ヒステリシス（履歴）現象の再現精度、構築された数値モデルが有する各種パラメータ同定の容易さ、計算コスト等に一長一短があり、近年においても盛んに研究されている。また、これらヒステリシスモデルを磁界解析に適用した研究もなされているが、ヒステリシスが解析精度に与える影響は明らかにされておらず、さらに、計算時間の増加等も問題となっている。さらに、現在提案されている解析手法の多くは初磁化曲線をベースとして研究されており、これまでに提案されている解析手法がヒステリシス特性を考慮した磁界解析にそのまま適用できるとは限らない。このように、ヒステリシス特性を考慮した磁界解析は実用化には至っていないのが現状である。

このような背景のもと、本研究ではヒステリシス特性を考慮した磁界解析の実用化を目的とする。これまで提案されているヒステリシスモデル中で、ヒステリシス現象の再現精度が良好でかつ計算コストも低く、認知度が高いプライザツハモデルと比較して同等以上のモデリング性能を有し、かつ記述がより簡単であるという特徴を有するプレイモデルに着目し、本論文では、このプレイモデルによるヒステリシス特性を考慮した磁界解析の実用化を目指す。実用化の課題として、プレイモデルのモデリング精度や記憶容量の増加、ヒステリシス特性を考慮した磁界解析の計算時間の増加、種々の初磁化曲線を考慮した解析手法のヒステリシス特性の適用等が挙げられるため、これらの解決手法を提案した。また、ヒステリシス特性の考慮の有無が解析結果に与える影響について検討し、ヒステリシス特性を考慮した磁界解析の有効性を明らかにした。

本論文は、6章で構成されており、各章の要約は以下のとおりである。

第1章では、本研究の背景と目的について述べる。

第2章では、本研究で用いるプレイモデルの原理・特徴について説明する。

第3章では、プレイモデルの同定データとして必要な直流ヒステリシス特性の推定方法を提案する。プレイモデルは時間に依存しないモデルであるため、渦電流の影響は分離して考える必要があるが、直流ヒステリシス特性を測定することは容易ではなく、また、渦電流の影響を無視できる程度の非常に低い周波数で測定することも容易ではない。そこで、比較的測定が容易な商用周波数以上の測定データから直流ヒステリシス特性を推定する手法を提案する。ただし、プレイモデルの形状関数の性質上、同定に用いるヒステリシスループの微分値が単調に増加する曲線が望ましいが、測定または推定した直流ヒステリシス特性は必ずしもこのようなデータであるとは限らないため、ベクトルプレイモデルにより算出される回転ヒステリシス損が負の値を示す場合

がある。そこで、同定データの初磁化曲線、交番ヒステリシス損失、保磁力、微分透磁率からプレイモデルに適したヒステリシスループの生成方法を提案し、負の回転ヒステリシス損を示すという問題を回避することが可能であることを示した。次に、初磁化曲線に対して提案されている高磁束密度領域における特性の推定手法を基に交番ヒステリシス損の推定に拡張し、プレイモデルの「準磁気飽和領域」の磁気特性の考慮方法を提案する。プレイモデルでは、同定データの範囲内でヒステリシス特性を再現することができるが、磁気飽和領域の同定データが得られていない場合、同定データより高い磁束密度で動作してもヒステリシス損は一定となるため、磁気飽和領域で動作する可能性があるモータ等の電気機器では、解析精度の低下が懸念される。本提案手法を適用することで、準磁気飽和領域のヒステリシス損失を算出することが可能となった。さらに、ヒステロン個数を低減した不等間隔分布関数を有するプレイモデルを提案する。プレイモデルでは、同定データの刻み幅の半分以下の磁束密度の変動が生じてマイナーループを描くことができないため、特にインバータ駆動の電気機器の鉄損解析精度の低下が懸念される。そこで、測定するヒステリシスループの本数を増やしたり、測定したヒステリシスループの間を補間する方法も提案されているが、多数本のヒステリシスループを用いて同定を行うと、プレイヒステロン個数も増加するため、記憶容量や計算時間の増大が懸念される。そこで、プレイモデルの分布関数を不等分割し、マイナーループの算出精度を維持しつつ、プレイヒステロン個数を低減することが可能となった。最後に、圧粉磁心を用いたりアクトルのような塊状鉄心を有する三次元モデルの磁界解析を行うために、三次元ベクトルプレイモデルを提案し、三次元場の有限要素磁界解析が実現された。

第4章では、ヒステリシス特性を考慮した簡易 TP-EEC 法を提案する。プレイモデルは、入力波形の中で絶対値が最大となった場合、それ以前の極値は全て消去され、その値はヒステロンの履歴に残り続ける。すなわち、一度でも極値が現れると、その極値は以降の解析結果に影響を与えることとなる。例えば、電圧印加時の解析において、解析モデルの時定数により突入電流が流れる場合がある。突発的に大電流が流れて鉄心が磁化されても、初磁化曲線を用いた解析の場合においては、定常状態に落ち着いたときの最終的に得られる結果には突入電流は影響を与えない。しかし、プレイモデルを用いた解析では、定常状態の磁束密度の動作点が突入電流時の動作点よりも低い場合は、突入電流が最終的に得られる解析結果に影響を与えることになる。そこで、簡易 TP-EEC 法の補正方法をプレイヒステロンの履歴にも適用することで、突入電流の影響を回避することができ、プレイモデルを用いた過渡現象の解析を実現した。次に、同定データのヒステリシスループの最大値・最小値の補正方法が有限要素磁界解析の収束特性に与える影響を検討し、補正を行わない場合には有限要素磁界解析のニュートン・ラフソン法が収束しない場合があることを明らかにし、ヒステリシスループの最大値・最小値の補正がヒステリシスループの再現向上だけでなく収束特性の改善にも寄与していることを明らかにした。

第5章では、ヒステリシス特性を考慮した積層鉄心の均質化法を提案した。積層鉄心による結果とヒステリシス特性を考慮した均質化法を適用した塊状鉄心による結果は良好な一致を示し、本提案手法の妥当性を検証した。また、提案した均質化法では、マイクロモデルの磁界の強さをマイクロモデルの磁束密度から直接的に算出しているため、ヒステリシス特性だけでなく磁気異方性を考慮することが可能である。次に、ヒステリシス特性の考慮の有無が解析結果に与える影響を明らかにした。磁路中に空隙のないモデルに関しては、ヒステリシス特性を考慮すると初磁化曲線を用いた磁界解析により得られる電流波形に差異が生じるため、鉄損だけでなく銅損にも差異が生じること定量的に示した。また、実機モデルとして電気学会の回転機の磁界解析に関連する調査専門委員会で提案されている埋込磁石同期モータ (D1 モデル) を用いて、ヒステリシス特性の考慮の有無がモータ特性に与える影響を明らかにした。ヒステリシス特性を考慮することで、初磁化曲線を用いた解析結果と比較して、コアバックのヒステリシス損に差異が生じることを明らかにした。さらに、ヒステリシス特性の考慮の有無が各種エネルギーに与える影響を検討した。

ヒステリシス特性の考慮の有無によって、鉄心部の磁気エネルギーの高調波成分に与える影響は小さく、主にロストルクに相当する直流成分に差異が生じることを明らかにした。以上の検討より、積層鉄心を有する電気機器においてもヒステリシス特性を考慮した磁界解析が実現可能となった。そして、ヒステリシス特性を考慮することで、初磁化曲線を用いた従来の解析と比較して電流波形やヒステリシス損分布に差異が生じることを明らかにし、高精度な解析が実現可能となった。

第6章では、本研究で得られた知見を総括し、各章毎に成果の要約を示す。