

京都大学	博士 (工学)	氏名	竹内 活徳
論文題目	磁界解析の高精度化と高速化に向けた巻線界磁形同期機の電氣的・磁氣的モデル化手法に関する研究		
<p>(論文内容の要旨)</p> <p>本論文は、巻線界磁形同期機（以下、同期機）の電気設計における磁界解析の活用促進という目的を達成するために、磁界解析の高精度化と高速化について検討したものであり、全6章からなる。</p> <p>第1章では、鉄鋼プラントや発電所で用いられている同期機は大型機器であるために、その開発においては、できる限り実機を使わず、シミュレーション上で設計結果を評価したいというニーズがあることを説明している。このような背景から、同期機の電気設計における代表的なシミュレーションツールである磁界解析において、高精度化と高速化の両立が必要であると問題提起している。この問題を解決するために、無負荷飽和曲線や負荷界磁電流の計算という実際の設計問題から、3種類のモデル化手法（電氣的・磁氣的モデル化手法と称されている）について必要性を導き出しており、第2、3、5章で、それらの詳細を述べている。</p> <p>第2章では、無負荷飽和曲線を高精度に計算するためのモデル化手法について論じている。はじめに、誤差要因を考慮しない場合の磁界解析を実施し、その計算値を測定値と比較することによって、誤差の傾向を分析している。その結果を踏まえて、4つの電圧領域を定義し、インダクタンスを体積積分によって表現する方法を用いることによって、各電圧領域において、異なる複数の誤差要因が、磁気回路中の異なる場所で発生していると推測できることを説明している。次に、各誤差要因を簡易にモデル化する方法を説明し、それぞれが無負荷飽和曲線における計算誤差に対して、どのような影響を与えるか調査している。最後に、山登り法による最適化を用いて、各誤差要因を表すモデル化定数を同定し、これらを複合的に考慮することによって、計算誤差を実用上十分なレベル（3%以下）まで低減できることを実証している。</p> <p>第3章では、端部磁束のモデル化手法と二次元解析の補正法について論じている。はじめに、二次元解析は、三次元解析に比べて、計算時間の観点で大きなメリットを有するが、巻線端部や鉄心端で発生する端部磁束が考慮できないため、計算精度が低いという課題があることを説明している。これを解決するためには、「簡易な方法で端部磁束を計算」し、「その結果を用いて二次元解析を補正する」という二点について検討が必要であると述べている。前者については、巻線端部のみを模擬した部分三次元解析に着目し、従来のモデル化手法では、鉄心の影響が考慮されていないために、端部磁束が過小評価されるという問題の解決に取り組んでいる。その結果、鉄心の影響は自然境界条件によってモデル化できること、さらに、境界条件を使い分けることにより、端部磁束が、漏れ磁束成分と電機子反作用磁束成分に分解できることを明らかとし、モデル規模が小さく、計算が短時間で実行できるという部分三次元解析のメリットを損なうことなく、計算精度の向上に成功している。次に、二次元解析の補正法として、漏れ磁束成分は、外部リアクトルによってモデル化するという従来手法を適用しつつ、電機子反作用磁束成分は、解析モデルのギャップ長を縮小することで表現するという新しい方法を提案している。すなわち、端部磁束が成分分解できるというメリットを活かした、高精度な補正方法となっている。最後に、提案手法の妥当性を確認するため、負荷時の電流と鎖交磁束の関係を測定し、解析値との比較を実施している。その結</p>			

果、補正した二次元解析の計算値は、測定値や三次元解析の計算値とほぼ一致することを実証している。

第4章では、第2章と第3章で提案したモデル化手法の有効性を、実用性の観点から確かめるため、実際の同期機設計において評価指標とする物理量（トルクや力率）に対する計算精度を検証し、また、二次元解析を用いることで、どの程度の計算時間短縮効果があるかを評価している。まず、三次元解析による計算値と測定値の比較を実施し、2章で検討した無負荷飽和曲線を高精度に計算するためのモデル化手法が、負荷時のトルクや力率を高精度に計算するためにも重要であることを確認している。次に、二次元解析による計算値と測定値の比較を実施し、トルクや力率に対しても、補正が有効に働いていることを確認している。最後に、三次元解析と二次元解析の計算時間を比較し、前者は約2時間（64コアの並列計算）、後者は約3分（並列計算なし）であることから、補正した二次元解析は、計算精度を悪化させることなく、計算時間を大幅に短縮する効果を有することを明らかとしている。

第5章では、インダクタンスを使用せずに同期機をモデル化する方法について論じている。はじめに、磁界解析の入力条件は電流であることから、電圧や出力、無効電力によって規定された動作点を入力条件とした計算は、磁界解析単体では実施できないこと、このため、動作点に対応した電流条件（例えば界磁電流）の同定は容易ではないという問題を説明している。これに対して、磁界解析の反復実行による同定法が提案されているが、同定したい動作点の数に比例して計算時間が増大してしまうことから、反復実行に依らない同定法が必要であるという課題を提示している。これを解決するために、電機子巻線の電流と鎖交磁束の関係をデータテーブル化して得られた飽和関数を用いることを提案しており、これを用いることによって、電流条件の同定という問題が、非線形の三元連立方程式を解くという単純な数学問題に帰着されることを明らかにしている。次に、連立方程式を解くための数学的な準備（変数変換、線形補間、非線形解法）について説明したのち、提案手法を用いて同定した電流条件の計算精度や計算時間を評価している。計算精度については、飽和関数の分割数をある程度大きくすることで、電圧の誤差が1%以下と実用上十分なレベルを満足すること、また、動作点の数が100を超えるような場合に、従来手法よりも計算時間が短くなる見込みであることが述べられている。最後に、鉄心の磁気飽和に起因した非線形性が電流条件に及ぼす影響について考察しており、dq軸間干渉や軸の回転によって、電流条件には大きな変化が生じること、これらすべての現象が提案手法には考慮されているため、正確な電流条件が同定できることについて解説している。

第6章では、本論文の成果を総括しており、検討した電氣的・磁氣的モデル化手法が、同期機のみならず、その他のさまざまな回転機における電気設計において、磁界解析の活用促進に大きく寄与するであろうという結論に至っている。また、残された課題についても触れられている。

氏名	竹内活徳
----	------

(論文審査の結果の要旨)

本論文は、巻線界磁形同期機（以下、同期機）を対象とした磁界解析の高精度化と高速化について研究したものであり、無負荷飽和曲線や負荷特性を解析する際のモデル化手法を提案するとともに、小型の同期機で各種特性の測定を行い、提案手法の妥当性を確認している。得られた成果は次の通りである。

1. 無負荷飽和曲線における誤差の傾向を分析することで、4つの電圧領域が定義できること、また、それぞれの領域において、異なる誤差要因があることを明らかとした。また、6個の定数を用いた簡易なモデル化手法ですべての誤差要因が表現できること、それによって、無負荷飽和曲線の全電圧領域で、測定値と解析値が概ね一致する結果が得られることを実証した。
2. 巻線の端部だけを模擬した部分三次元解析を用いて、二次元解析を用いた場合の誤差要因である端部インダクタンスを正確に計算するためには、鉄心部分の影響を考慮する必要があることを指摘し、これに対する解決策として、自然境界条件を用いたモデル化手法を提案した。さらに、得られた端部インダクタンスの影響を、外部リアクトルとギャップの補正という2つの方法を併用することによって、二次元解析に反映する方法を提案し、測定値とほぼ一致する結果が得られることを示した。
3. 上記、1と2のモデル化手法を用いることで、二次元解析でも、トルクや力率の計算精度が実用上十分なレベル（論文中で誤差5%以下と定義）まで改善できること、ならびに、三次元解析を用いる場合に比べて、計算時間を大幅に短縮する効果が得られることを実証した。
4. 同期機の動作点は、電圧、出力、無効電力によって与えられるが、それに対応する電流条件を同定するという問題を解くためには、大規模な連成解析を実施しなければならないという問題点を指摘した。これを解決するために、飽和関数を用いて同期機をモデル化する方法を提案し、単純な非線形三元連立方程式を解く問題に帰着できることを示した。さらに、計算精度や計算時間を評価し、実用上の課題である、多数の動作点を対象として同定作業を行う場合において、有効な手法であることを示した。

以上のように、本論文は、磁界解析の高精度化と高速化を実現するためのモデル化手法を提案しており、同期機的设计における磁界解析の積極的活用という観点からも、学術上、實際上寄与するところが少なくない。よって、本論文は博士（工学）の学位論文として価値あるものと認める。

また、令和3年2月19日、論文内容とそれに関連した事項について試問を行って、申請者が博士後期課程学位取得基準を満たしていることを確認し、合格と認めた。