

京都大学	博士 ( 工 学 )	氏名	飛田 美和
論文題目	Theoretical Study on the Nonlinear Model Order Reduction Method and Its Application to Motor Analysis (非線形モデル縮約法の理論的研究とモータ解析への応用)		
(論文内容の要旨)			
<p>本論文は、電気機器内の渦電流磁界を少数の未知数で表現するモデル縮約手法として有力な Cauer Ladder Network (CLN) 法を非線形化する手法を理論的に検討し、その理論をモータ解析およびヒステリシス磁界解析に応用した結果をまとめたものであり、7章からなっている。</p> <p>第1章は序論であり、まず、現在のモータ解析においても計算コストが膨大になり得る問題点を述べ、計算精度を維持しながら未知数の数を削減して計算時間を短縮するモデル縮約手法の適用が有力な解決法であること、また非線形モデル縮約法の開発の必要性を述べている。次に、各種のモデル縮約手法を概観した後、最近提案されたモデル縮約手法である CLN 法の開発状況について説明し、その中で、CLN 法の非線形化、ヒステリシス特性の考慮、モータ解析への応用についての現状を説明している。これを踏まえ、本論文では、非線形 CLN 法の理論的な整備を行い、それを、非線形モータ解析とヒステリシス CLN 法へ応用することが本論文の目的であることを述べ、論文の構成を示している。</p> <p>第2章では、第3章以降で議論される CLN 法に対する準備として、準定常電磁界の支配方程式と、有限要素定式化について説明した後、CLN 法による、直交関数 (基底) の構成法と、電磁界と等価な表現である Cauer 回路を導く方法を説明している。</p> <p>第3章では、CLN 法により非線形問題を扱うための理論整備を行っている。先行研究で磁気飽和を取り扱うために提案された非線形化手法を、パラメータ化 CLN 法として定式化し、パラメータの変化に伴う基底の動的なふるまいの影響を調べている。回路素子のあるパラメータ (例えば初段の電流) の関数として与える場合について、CLN 法による導出過程に立ち戻るにより状態方程式を導出し、その中に、Cauer 回路方程式に加えて、直交基底関数をパラメータで微分した要素を含む項が現れることを見出した。この項は、パラメータに対する基底ベクトルの動的な変化を表しており、これをパラメータ変動項と名付けている。得られた状態方程式を鉄芯インダクタの解析に適用して、パラメータ変動項の影響を調べ、磁気抵抗率を用いる場合は、パラメータ変動項の影響が大きく、これを考慮することにより、計算精度を改善できることを明らかにした。一方で、微分磁気抵抗率を用いる場合は、パラメータ変動項は非常に小さく、無視することも可能であることを示している。また、磁気抵抗率を用いる場合についても、磁束を回路の状態変数に選ぶことで、パラメータ変動の影響を無視できることを確認した。</p> <p>第4章では、前章での理論検討に基づき、パラメータ化 CLN 法を誘導モータ電磁界のモデル縮約法に適用している。モータ解析では、多入力・多出力 (マルチポート) CLN が用いられる。鉄芯材料の磁気飽和特性を反映させるため、マルチポート回路要素をパラメータ化することが必要であるが、パラメータ選択の自由度が高く、適切なパラメータ選択が求められる。本論文では、3相平衡電源を仮定し、3相入力電流の振幅と位相、3相入力磁束の振幅と位相、空隙部磁束の振幅と位相の3種のパラメータ化を比</p>			

較し、入力磁束または空隙部磁束をパラメータ化することで、誘導モータのモデル縮約を良い精度で実現した。数値計算例では、幅広い運転条件（滑り、電源の周波数と振幅）で有限要素解析の結果を磁気飽和の影響を含めて精度良く再現することを示している。

第 5 章では、第 4 章での結果に基づき、可変リラクタンス (VR) ステッピングモータのモデル縮約手法を開発している。VR ステッピングモータの解析では、電流源の入力シーケンスと電源磁束の振幅をパラメータとして使用することを提案している。機械的負荷を含めた運動方程式と連成し、動的なモータ挙動を解析している。数値解析例により、提案手法は、ステップ回転や同期外れなど、高い精度が要求される運転条件においても、有限要素解析とよく一致する結果を得た。このことは、既存のモデル縮約法では必ずしも容易でなかった非線形渦電流解析を導入することにより、回転子に生じる渦電流の影響についても提案手法は精度よく考慮できることを示している。

第 6 章では、ヒステリシス磁界解析とそのモデル縮約に取り組んでいる。PWM 入力時など、高調波を多く含む入力に対しては、マイナーヒステリシスループの考慮が必要になる。そのためには、鉄芯材料のヒステリシス特性を組み込んだ有限要素磁界解析が必要になるが、その計算コストが大きい。そこで、本章では、まず、有限要素ヒステリシス磁界解析の効率的な解法として、半陰解法 (SI 法) と予測子修正子 (PC) 法の組み合わせを提案し、その有効性を、正弦波入力および PWM 入力における数値解析例にて示している。次に、ヒステリシス特性を考慮した電気機器のモデル縮約法を以下の手順で構成する手法を提案している。最初に、鉄芯材料の正規磁化曲線を用いてパラメータ化 CLN 法を適用することにより、非線形 Cauer 回路を構成する。その後、Cauer 回路の初段のインダクタを、機器の静的磁化特性を再現するヒステリシスモデルに置き換える。ヒステリシスモデルの同定には、前述のヒステリシス磁界解析により得た機器の直流電流-磁束ループを用いる。後段のインダクタについては、ヒステリシス特性の可逆部特性にパラメータ化した係数を乗じて特性を与える。ヒステリシス Cauer 回路の方程式の解法として、前述の SI 法と PC 法をここでも用いる。PWM 入力下における数値解析例により、提案手法が効率的に精度の高い縮約モデルを構成することが可能なことを明らかにした。

第 7 章は結論であり、本論文で得られた成果について要約している。

(論文審査の結果の要旨)

本論文は、電気機器内の渦電流磁界のモデル縮約手法として有力な CLN 法を非線形化する手法を理論的に検討し、その理論を、誘導モータ解析、可変リラクタンスステップモータ解析、および、ヒステリシス磁界解析に応用した結果をまとめたものである。本論文によって得られた主な成果は以下の通りである。

(1) CLN 法は、渦電流磁界を少数の基底となるモードに分解し、各モードの時間変化を電気回路で表現する手法であり、電気機器に現れる磁気飽和を表現するために、回路定数の飽和度を表すパラメータで変化させる手法(パラメータ化 CLN 法)により非線形化が実現される。本論文では、同手法を厳密な形で導出し、パラメータの時間変化によって生じる項(パラメータ変動項)が状態方程式に現れることを示した。磁気抵抗率を用いて定式化する場合にパラメータ変動項の効果が大きくなるが、微分磁気抵抗率を用いる、あるいは、磁束を状態変数に選択することで効果を無視できることを明らかにした。

(2) 提案した非線形 CLN 法をマルチポート化することにより、誘導モータの非線形モデル縮約を開発した。磁気飽和に関するパラメータをマルチパラメータ化する必要があるため、3 相電源電流の振幅と位相、3 相電源磁束の振幅と位相、空隙部磁束の振幅と位相の 3 通りのパラメータ化を提案し、磁束を用いる 2 手法のどちらでも精度よく誘導モータの動作を縮約表現できることを示した。

(3) 非線形 CLN 法を可変リラクタンスステップモータのモデル縮約に応用した。電源磁束の振幅と励磁モードをパラメータにすることで高精度に縮約モデルを構成できることを示した。外部負荷を含めた運動方程式と連成することで、ステップ回転や同期はずれなどの過渡解析を精度よく高速に行えること明らかにした。

(4) 非線形 CLN 法をヒステリシス磁界の縮約表現に応用する手法を開発した。まず、正規磁化曲線を用いて非線形 CLN を構成した後、CLN 初段のインダクタに磁気ヒステリシス特性を考慮することにより、効率的に縮約モデルを構築することに成功した。また、縮約前のヒステリシス磁界解析についても、非線形反復を回避する効率的な計算手法を開発した。

上記のように、本論文は、非線形 CLN 法を理論的に整備し、モータ解析とヒステリシス磁界解析への応用に成功しており、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 6 年 1 月 17 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。