

氏 名	藤 原 徹
授 与 学 位	博 士 ( 工 学 )
学 位 授 与 年 月 日	平 成 8 年 10 月 9 日
学 位 授 与 の 根 拠 法 規	学 位 規 則 第 4 条 第 2 項
最 終 学 歴	昭 和 55 年 3 月 京都大学大学院工学研究科金属加工学専攻修士課程修了
学 位 論 文 題 目	非線形磁気特性を考慮した交流器の動作解析と設計に関する研究
論 文 審 査 委 員	東北大学教授 荒井 賢一 東北大学教授 中村 慶久 東北大学教授 一ノ倉 理

## 論 文 内 容 要 旨

変流器は電流を変換するトランスであり、電流線に対して絶縁を維持して電流を計測することが可能であるという長所を有している。この長所を利用して、産業・家庭用の配電盤・遮断器・スイッチング電源の中で電流制御や過電流保護のための電流検知センサとして多用されている。変流器の要求特性は一般のトランスと同様に小型・高効率なことがあげられる。通常の電力変換トランスでは温度上昇が問題となるのに対して、変流器では電流計測を目的としているために、誤差特性が問題となる。この変流器の誤差の主因は磁心材料の非線形性にある。つまり、変流器は磁心材料特性の影響が大きいトランスであるといえる。したがって、変流器の設計のためには、磁心材料特性と変流器特性の関係を把握しておくことが必要となる。ここで、変流器特性とは、測定1次電流と2次負担抵抗電圧との関係のことを示している。

変流器の動作特性は、従来は磁心特性を励磁インピーダンスで表現する等価回路法を用いて解析されてきた。しかし、この解析法では、磁心材料の磁気飽和やヒステリシスといった非線形特性を表現することが困難であり、磁心材料特性と変流器特性の関係を十分に解明することができていなかった。特に、変流器の高調波電流特性、複合磁心を用いた変流器特性や飽和型直流変流器の特性については、等価回路法による動作解析は十分とはいえなかった。このために、これらの変流器特性を理論解析により計算することは困難であり、変流器設計は経験的になされていた。

本研究では、複素透磁率および Jiles-Atherton モデルと Chua モデルのハイブリッドモデルを用いることで、ヒステリシスを含む磁心の非線形性を定式化し、これを用いて変流器を動作解析することで、変流器特性と磁心材料特性との関係を明確にし、各種機能の変流器の設計に応用することを検討した。

### 第 1 章 緒 言

第1章では、まず、現在実用化されている変流器の長所・用途・要求特性についてまとめた。つまり、変流器は測定電流線に対して絶縁が維持できるという長所を活かして、産業・家庭用の配電盤・遮断器の中で入出力電流制御や過電流保護のために電流検知用として使用されていることを示し、要求特性として測定精度の向上・測定電流の広範囲化・小型化があることを示した。

次に、これらの要求特性に応えるための変流器の動作解析法として、従来の等価回路法の原理とその問題点について記述した。さらに、これらの問題点を解決するために、本研究の意図するところをまとめた。

## 第2章 定常電流測定用変流器の動作解析と設計への応用

第2章では、変流器として最も多く使用されている交流定常電流測定用変流器を設計するために、磁心材料特性とこのタイプの変流器特性の関係を検討した。具体的には、磁心材料特性が、測定1次電流 $I_1$ と誤差特性（変流比誤差 $\varepsilon$ 、位相角 $\theta$ ）との関係に与える影響について検討した。

まず、この変流器の動作状態では磁心の磁場 $H$ および磁束密度 $B$ が正弦波となることから、磁心材料特性が複素透磁率 $\mu^*$ で表現できるとともに、 $\mu^*$ が最大励磁磁束密度 $B_m$ に依存して変化することを実験的に示した。また、実際の $\mu^*$ の表現法として、絶対値 $\mu_a$ および遅れ角の正弦 $\sin \delta$ を $B_m$ の実験式として表わすことを示した（具体的には $\mu_a$ および $\sin \delta$ を $B_m$ の3次式で表現すれば実験式による計算値と測定値は良好な一致を示す）。

次に、電流・電圧の各特性値を複素数表現し、交流磁心特性として $B_m$ への依存を考慮した $\mu^*$ を用いた場合の、変流器の1次電流 $I_1$ と変流比 $K$ および位相角 $\theta$ の関係式を導出した。

さらに、2種類（パーマロイ、ファインメット）の磁心材料で交流の定常電流測定用変流器を試作し、 $I_1$ と $K$ 、 $\theta$ の関係を測定するとともに、先に導出した計算式でこれらの関係を計算した。この結果、測定値と計算値は良好な精度で一致をみた。

以上より、交流の磁心材料特性としての複素透磁率が判明すれば、JIS規格に合致した誤差特性の定常電流測定用変流器を理論解析のみで設計することが可能となった。

## 第3章 磁気飽和特性の表現法

第3章では、変流器の磁気飽和特性を解析する前段階として、交流磁化特性を汎用電気回路シミュレーションソフトSPICEを用いて表現する方法を検討した。SPICEでは非線形磁化特性の表現法としてJiles-Athertonモデルが用いられているが、実際の磁心材料特性を表現する上で、パラメータの導出法、高磁場特性の表現法、渦電流特性の表現法といった問題があった。本章では、理論式と測定BHデータを比較・検討することで、これらの問題の解決案を提案した。これらをまとめると以下ようになる。

- (1) 各種磁心材料の直流BHデータからJiles-Athertonモデルの磁化パラメータを容易に計算する方法を導出した。この方法は従来は困難であった高角型比の磁心材料にも適用可能である。
  - (2) 磁気飽和後の高磁場領域の磁化特性は単純なJiles-Athertonモデルでは表現できないことを示すと同時に、この領域の磁化特性は高磁場磁化率で表現できることを示した。
  - (3) 等価渦電流磁場 $H$ と磁束密度の時間微分 $dB/dt$ との関係を広範囲に表現できる実験式を導出し、Jiles-AthertonモデルとChuaモデルとのハイブリッドモデルにより、交流BH特性が表現できることを示した。
  - (4) 上記ハイブリッドモデルのマイナーループは近似的に楕円形状となり、複素透磁率で表現できることを示した。
- (1)~(3)の方法で計算した各種の磁心材料の交流BH曲線は、測定値と良好な一致をみた。以上から、各種の磁心材料の交流磁化特性を広い励磁範囲でSPICEで表現できることを明確にした。

## 第4章 飽和磁心を用いた変流器の動作解析と設計への応用

第4章では、まず、前章で得られたJiles-Athertonモデルのパラメータや渦電流表現式を用い、SPICEで変流器特性を解析する方法を明確にした。次に、この解析法を用いて以下の変流器の動作特性を解析し、計算値と測定値を比較した結果、両者は良好な精度で一致を示した。

- (1) 環状磁心を用いた変流器の高調波電流特性の動作解析

環状磁心を用いた交流用変流器の周波数特性および磁気飽和特性を解析し、高調波電流に対する変流器特性をSPICEで解析した。

- (2) 複合磁心を用いた零相変流器の飽和特性の動作解析

漏電遮断器で地絡電流を検知する零相変流器は高範囲の電流を検知するために複合磁心を使用しているが、この零相変流器の過地絡電流特性を解析した。

- (3) 非環状磁心を用いた変流器の動作解析

家庭配線用の電流検知機能付スイッチに用いられる非環状磁心を用いた変流器の動作特性を解析した。

#### (4) Kramer 型直流変流器の動作解析

複数の磁心を用い、磁気飽和を利用して直流電流を測定する Kramer 型変流器特性を解析した。

以上より、磁心材料特性が判明すれば、各種の変流器特性が計算可能となり、SPICE 解析により各種変流器を設計することが可能となった。

### 第 5 章 結 言

第 5 章では、本研究で説明された事項を以下のようにまとめた。

- (1) 各種磁心材料を未飽和状態で交流励磁したときの BH 特性を調べて、最大磁束密度  $B_m$  によって、BH 特性を表わす複素透磁率  $\mu^*$  が変化することを確認し、 $\mu^*$  を  $B_m$  多項式を用いた実験式として表現できることを示した。
- (2) 前項の  $\mu^*$  と  $B_m$  との関係を考慮して、交流の定常電流検知用の変流器について、測定 1 次電流と誤差特性（変流比誤差，位相角）の関係式を見い出した。さらに、試作変流器の測定誤差特性が、この関係式を用いた計算値と良好な一致をすることを確認した。
- (3) 磁心材料の測定データを用いて、高角型製の磁心材料についても Jiles-Atherton モデルのパラメータを良好な精度で計算できる方法を見い出した。
- (4) 磁気飽和後の高磁場領域での磁化特性を調べ、Jiles-Atherton モデルだけでは磁化特性を表現することができないことを実験的に示した。さらに、この領域の磁化特性は特性パラメータとして高磁場磁化率を追加することで表現できることを示した。
- (5) 広範囲の周波数と最大磁束密度の条件で、等価渦電流磁場  $H_e$  と磁束密度の時間微分  $dB/dt$  との関係を実験的に調べ、 $H_e$  が  $dB/dt$  の指数関係で表現できることを示した。
- (6) 無方向性 6.5% けい素鋼を用いた変流器について、高調波電流検知特性を調べ、SPICE 解析による計算値と測定値と比較した結果、両者は良好な精度で一致することを示し、SPICE 解析により、変流器の高調波電流の検知特性が計算できることが確認された。
- (7) パーマロイと軟鉄（JIS規格SPCC）との複合磁心を用いた変流器について過電流による飽和磁気特性を調べ、SPICE 解析による計算値と測定値と比較した結果、両者は良好な精度で一致することを示し、SPICE 解析で複合磁心を用いた零相変流器の過地絡特性を計算できることが確認された。
- (8) Mn-Zn フェライトの非環状磁心を用いた変流器について、この形状の磁心を直列に接続された磁心にモデル化することで、SPICE 解析により変流器特性を計算できることを示した。次に、この変流器の磁気飽和特性について、計算値と実験値は良好な精度で一致することを示し、非環状磁心の変流器についても SPICE 解析により特性が計算できることを示した。
- (9) 磁気飽和を利用した Kramer 型直流変流器特性を調べ、SPICE 解析による計算値と測定値と比較した結果、両者は良好な精度で一致することを示し、SPICE 解析で飽和型直流変流器特性を計算できることが確認された。

なお、本論文では家庭機器用の変流器の動作解析と設計について研究を行ったが、本研究の解析法は産業用の大電流検知用変流器の解析・設計にも直接応用可能である。したがって、本研究の結果、磁心材料の特性が判明すれば、理論解析のみで変流器特性を計算することが可能となった。また、実際の磁心材料が入手できなくても、シミュレーションによって各種変流器特性を予測することができ、その変流器に最適の磁心材料を選定することも可能となった。

## 審査結果の要旨

電力を有効かつ安全に利用する上で過電流保護や入出力電流の制御は必要不可欠であり、このためには、電流値の正確な検知が必要となる。変流器は電流を変換するトランスであり、絶縁性を維持して電流を測定できることから電流センサとして用いられているが、その用途の拡大にともない小型化・高精度化・高機能化が強く望まれるようになってきた。本研究は、これらの背景を踏まえ変流器の動作特性の解析を行い、ヒステリシスおよび過電流を含む磁心材料の非線形特性の新たな表現法を提案するとともに、これを用いることにより各種変流器の高性能化のための動作解析・設計が可能となることから明らかにしたもので、全編5章よりなる。

第1章は緒言で、本研究の意義と目的を述べている。

第2章では、交流定常電流の測定に用いられている変流器の詳細な動作解析を行い、変流器として重要な特性である一次電流と変流比誤差ならびに位相角との関係が、磁心の複素透磁率の最大励磁磁束密度依存性を考慮することにより説明できることを明らかにし、その関係式を導出した。さらにこれを用いて、パーマロイおよびファインメット磁心を用いた変流器を設計・試作し、誤差特性がJIS規格の範囲内に納まったことを確かめている。

第3章では、直流磁化特性の代表的表現法である Jiles-Atherton モデルを基に、その各種パラメータの高精度決定法として多数の測定値を取り込む計算手法により高角型比特性を有する磁心材料でも磁化特性の表現が十分可能となること、また高磁場磁化率を新たなパラメータとして導入することにより磁気飽和近傍における磁化特性も表現できるようになることなどを明らかにしている。さらに磁束密度の時間変化から実験的に決定させる等価渦電流磁場を取り込むことにより交流磁化特性も正確に表現可能となることを示し、珪素鋼、パーマロイ磁心を用いた実験結果と比較して、極めて良く一致することを確認している。これは磁化特性を表現する新たな表現法として高く評価される。

第4章では、複合磁心や非環状磁心を用いた変流器に前述の表現法を適用した場合について検討するとともに、従来用いられてきた等価回路法では精度の良い動作解析・設計が困難である Kramer 型変流器のような磁気飽和形変流器においても、この表現法を用いることにより高精度設計が可能となることを確認している。

第5章は結論である。

以上要するに本論文は、非線形磁心材料の直流および交流磁化特性の新しい表現方法を提案し、種々の変流器の特性と比較・検討することにより、新たな変流器の設計法の基礎を確立したもので、磁気工学の発展に寄与するところが少なくない。

よって、本論文は博士（工学）の学位論文として合格と認める。