

学 位 論 文 題 名

誘導電動機のベクトル制御と効率最適化
速度制御系構成に関する研究

学位論文内容の要旨

誘導電動機のベクトル制御は、可変速 AC ドライブシステムの中心的技術として、産業界のあらゆる分野に応用されつつある。従来、ベクトル制御は、1 次回転磁界と 2 次回転磁界とが過渡状態においても同期しているとの仮定のもとに理論が展開されており、2 次鎖交磁束座標系で得られるベクトル関係をいかに実現するかポイントがおかれていた。ベクトル制御に関する多くの研究、開発は、PWM インバータなどの電流制御形電力変換器の開発と、ベクトル演算器などの制御回路の設計、開発に集中しており、過渡現象などの理論的な検討はほとんど行われていない。1 次回転磁界と 2 次回転磁界とが過渡状態においても同期しているとの保証はなく、ベクトル制御の過渡現象の把握の欠如、検討の必要性が指摘されていた。

本論文は誘導電動機の瞬時値制御の基礎となる状態方程式を求め、制御工学の観点からベクトル制御理論を構築し、制御理論を応用したベクトル制御系、効率最適化速度制御系構成を構成を検討したものである。

本論文は全体で 7 章で構成されており、以下に各章の概略を述べる。

第 1 章は本論文の研究の背景と問題点を述べ、本論文の主題であるベクトル制御と効率最適化制御に関する理論の概略と特徴を明らかにしている。

第 2 章では、本論文の基本式である同期角速度で回転する座標軸の電圧方程式、鎖交磁束式、トルク式を求めるのに必要なベクトルの概念、座標変換理論を述べた。

同期角速度で回転する座標軸の諸量は周波数成分を含まず直流分のように取り扱うことができ、この座標軸の状態方程式が誘導電動機の過渡現象を記述する数学モデルであることを指摘している。

第 3 章では、2 次鎖交磁束とトルクは 1 次電流制御となることに着目して、電流制御に対応した状態方程式を導出している。誘導電動機は 3 入力 3 出力 3 次系の制御対象であることが明ら

かにされ、本論文の主題の一つであるベクトル制御理論が確立される。次に、電流制御入力の状態方程式を基に2次鎖交磁束座標系で得られる良好な制御特性を定常、過渡状態ともにいかに実現するかを考え、現代制御理論の立場からベクトル制御理論を展開する。ベクトル制御は、2次電流に対抗して流れるトルク成分電流とこれと直交する磁束成分電流を独立に制御することである。このため、同期角速度で回転する座標軸を定常、過渡状態にかかわらず、常に2次鎖交磁束軸に一致させる制御を行えば、1次電流のトルク成分電流と磁束成分電流を独立に制御できることを明らかにしている。ベクトル制御系と速度制御系を同時に構成する有効な手法として、多入力多出力系の最適レギュレータ理論による制御系構成法を提案し、本論文で提案するベクトル制御法の有用性を等価直流モデルを用いてシミュレーションを行い、目標値変動、パラメータ変動、外乱変動に対して良好な特性が得られることを示した。

第4章では、ベクトル制御誘導電動機の損失と効率についての関係を明確にし、2次鎖交磁束を可変する効率最適化の手法を示した。誘導電動機においては、制御入力で制御可能な損失は銅損と鉄損である。そこで、同期速度で回転する座標軸の定常状態の等価回路より損失を評価し、制御可能な損失を1次電流の有効成分であるトルク成分電流と磁束成分電流とで表し、ベクトル制御誘導電動機の効率最適化の条件を導出した。本論文の効率最適化制御は、制御可能な損失を最小とする1次電流のトルク成分電流と2次鎖交磁束成分電流の電流比から、電流誤差を定義することにより、これを零と制御することにより実現される。最大効率運転は磁束を制御することになり高速応答は期待されないとされてきたが、2次回転磁界の角速度を制御することにより、鎖交磁束一定制御のベクトル制御と同程度の高速応答が得られることをシミュレーションによって確認している。効率最適化速度制御系構成は本論文の主題の一つであり、第4章の内容がそれに当てられている。

第5章では、ベクトル制御の最大の問題点である2次鎖交磁束の推定について考察を行い、1次鎖交磁束シミュレータ、双線形磁束オブザーバによる2次鎖交磁束の推定法を検討する。従来の静止座標軸の状態方程式に基づいた磁束演算において、電流モデルでは、推定値への収束速度は2次回路の時定数に限定され、高速推定が不可能であり、また推定値は2次抵抗変動の影響が大きいことが指摘されていた。電圧モデルからの演算では、推定値と真値との誤差が零に収束しないなどの問題点があった。本章では、同期角速度で回転する座標軸の状態方程式を基に、回転磁界に蓄えられるエネルギーの無効分から鎖交磁束を推定する磁束シミュレータについて考察を行っている。同期角速度で回転する座標系を採用すれば、電流モデル、電圧モデルの両者とも推定誤差が零に収束する磁束シミュレータが構成できることを示す。

磁束シミュレータの推定誤差の収束度は、1次側、あるいは2次側回路の時定数で定まるので、2次鎖交磁束を高速推定する有効な方法として、同期角速度で回転する座標系の状態方程式に基づいて双線形オブザーバを構成し、これをベクトル制御系に応用して、良好な制御特性が得られることをシミュレーションによって検証した。

第6章では、ベクトル制御に代わる制御として注目されている1次鎖交磁束制御の基本理論を検討している。1次鎖交磁束制御は電圧制御になることから、電圧制御入力の状態方程式より、1次鎖交磁束制御における1次電流の磁束成分電流とこれと直交するトルク成分電流の非干渉化の物理的意味を明確にした。最適レギュレータ理論を応用した1次鎖交磁束制御法とベクトル制御法の比較、検討を行い、1次鎖交磁束制御法は1次電圧回路が非干渉化され、2次抵抗変動などのパラメータ変動が生じて発生トルクに影響しない制御系構成が可能であることを指摘し、1次鎖交磁束制御の有用性をシミュレーションにより検証した。さらに、誘導電動機の損失を一般化し、1次鎖交磁束制御による効率最適化手法を明らかにしている。1次鎖交磁束一定制御と1次鎖交磁束可変による効率最適化速度制御系のシミュレーション結果より、1次鎖交磁束制御による効率最適化制御法の有用性を示した。

第7章は本論文の結論として本論文の成果をまとめるとともに、今後の研究課題について述べている。

学位論文審査の要旨

主査	教授	土谷	武士
副査	教授	深井	一郎
副査	教授	長谷川	淳
副査	教授	島	公脩

本論文は、誘導電動機の瞬時値制御法として、近年注目されているベクトル制御系と効率最適化制御系構成を目的としており、誘導電動機の瞬時値制御の基礎となる状態方程式を明らかにし、制御工学の観点からベクトル制御理論を構築し、制御理論を応用したベクトル制御系、効率最適化速度制御系を達成している。本論文で提案されている効率最適化制御法は、一次電流のトルク成分電流と2次鎖交磁束の比を最適に制御することにより、従来の効率最適化制御法に比較

して、過渡状態ではベクトル制御系の制御性能を損なうことなく、定常状態では最大効率が得られる制御系構成が可能であることを明らかにしている。

本論文は全体で7章で構成されており、以下に各章の概略を述べる。

第1章は本論文の研究の背景と問題点を述べ、本論文の主題であるベクトル制御と効率最適化制御に関する理論の概略と特徴を明らかにしている。

第2章では、本論文の基本式である同期角速度で回転する座標軸の電圧方程式、鎖交磁束式、トルク式を求めるのに必要なベクトルの概念、座標変換理論を述べている。同期角速度で回転する座標軸の諸量は、周波数成分を含まず直流分のように取り扱うことができ、この座標軸の状態方程式が誘導電動機の過渡現象を記述する数学モデルであることを指摘している。

第3章では、誘導電動機は3入力3出力3次系の制御対象であることが明らかにされ、本論文の主題の一つであるベクトル制御理論が確立される。

電流制御入力の状態方程式を基に、現代制御理論の立場からベクトル制御理論を展開している。ベクトル制御系と速度制御系を同時に構成する有効な手法として、多入力多出力系の最適レギュレータ理論による制御系構成法を提案し、本論文で提案するベクトル制御法の有用性を等価直流機モデルを用いてシミュレーションを行い、目標値変動、パラメータ変動、外乱変動に対して良好な特性が得られることを示している。

第4章では、ベクトル制御誘導電動機の損失と効率についての関係を明確にし、2次鎖交磁束を可変する効率最適化の手法を示した。最大効率運転は磁束を制御することになり、高速応答は期待されないとされてきたが、2次回転磁界の角速度を制御することにより、鎖交磁束一定制御のベクトル制御と同程度の高速応答が得られることをシミュレーションによって確認している。効率最適化速度制御系構成は本論文の主題の一つであり、第4章の内容がそれに当てられている。

第5章では、ベクトル制御の最大の問題点である2次鎖交磁束の推定について考察を行い、1次鎖交磁束シミュレータ、双線形磁束オブザーバによる2次鎖交磁束の推定法を検討している。本章では、同期角速度で回転する座標系を採用すれば、電流モデル、電圧モデルの両者とも推定誤差が零に収束する磁束シミュレータが構成できることを示している。磁束シミュレータの推定誤差の収束度は、1次側、あるいは2次側回路の時定数で定まるので、2次鎖交磁束を高速推定する有効な方法として、双線形オブザーバを構成し、これをベクトル制御系に応用して、良好な制御特性が得られることをシミュレーションによって検証している。

第6章では、ベクトル制御に代わる制御として注目されている1次鎖交磁束制御の基本理論を検討している。最適レギュレータ理論を応用した1次鎖交磁束制御法とベクトル制御法の比較、

検討を行い、1次鎖交磁束制御法は、1次電圧回路が非干渉化され、2次抵抗変動などのパラメータ変動が生じて発生トルクに影響しない制御系構成が可能であることを指摘し、1次鎖交磁束制御の有用性をシミュレーションにより検証している。さらに、誘導電動機の損失を一般化し、1次鎖交磁束制御による効率最適化手法を明らかにしている。1次鎖交磁束一定制御と1次鎖交磁束可変による効率最適化速度制御系のシミュレーション結果より、1次鎖交磁束制御による効率最適化制御法の有用性を示している。

第7章は本論文の結論として本論文の成果をまとめるとともに、今後の研究課題について述べている。

以上、本論文は誘導電動機が3入力-3出力の制御対象であることを明らかにし、速度制御、ベクトル制御、効率最適化制御を同時に実現する制御系構成法を可能にした点で、その工学的意義は大きく、今後の制御理論を応用した産業用ドライブシステムの発展に貢献すること大である。

よって著者は、博士（工学）の学位を授与される資格あるものと認める。