

学位論文題名

回転機の高性能化速度制御法に関する研究

学位論文内容の要旨

技術革新の進展に伴い、産業活動において交流機に対する高度な利用法が望まれている。例えば、大容量鉄鋼プラントなどでは直流機に代わり、無整流子電動機(CLM)を用いた可変速システムや、産業の自動化に欠かせない産業用ロボット用の永久磁石界磁形同期電動機(PMモータ)可変速システムなどがある。そこでは、電力用半導体デバイスの発達に伴い、インバータ、コンバータ等を用いた交流機の可変速駆動を可能としている。また制御理論の応用の進展により、従来にない特性を交流機の可変速システムに賦与することが可能となってきた。特に制御用マイクロプロセッサや高速信号処理用DSPの出現は、制御理論の応用を可能とする環境をつくり出し、アナログ回路では実行困難な制御アルゴリズムの実行が可能となっている。これらを通じ、直流機の制御性能を超えて、ブラシ交換不要、モータの運転効率やトルク特性を向上させた交流電動機の可変速システムの実現が重要課題として認識されている。本論文では、以上のような観点から交流機を用いた可変速システムの高性能化をはかる研究を行い、その成果をまとめたものである。

第1章は総論で、電動機利用の社会発展や制御理論の発展、そしてパワーエレクトロニクスの進展を明らかにし、これらを通じて本研究の背景とその目的を明らかにしている。

第2章では、大容量の可変速システムに用いられるCLMの高性能化速度制御法が提案されている。機械系も含めたCLM可変速システムの数式モデルより、2入力系であることから制御目標を2つとすることが可能で、速度制御を第1の制御目標としながら、運転効率最大を第2の制御目標にとることが出来き、電動機が大容量なため省エネルギー効果は顕著となる。電動機の無負荷損と銅損の関係から電動機の効率を最大とする関係式が示され、電機子電流と界磁電流の関係を調節する制御アルゴリズム化している。しかし、CLM可変速システムでは2つの解決すべき問題がある。1つは負荷急増時などの過渡時に電機子電流が急増するためサイリスタの転流失敗による不安定運転が引き起こされること、第2は回転磁極の磁束もシステムの状態量であるが、物理的に検出困難なため推定する必要があること、である。本研究では転流失敗による不安定性を除去するために、電流コントローラ概念を導入し、従来に比較して転流失敗を引き起こしにくいシステムが構成できる。これは、サイリスタの転流限界が界磁電流の増加とともに拡大する関係より、サンプル時刻毎に転流限界電機子電流を流す入力電圧を計算し、速度制御系制御入力電圧と比較し、どちらか小さい方を選択し、転流失敗を防ぐものである。第2については、システムの状態方程式からサンプル周期毎の関係式を構成し、算術的な取り扱いを経て状態量を推定する手法で、オブザーバを別に設計せずに観測可能な出力信号を用いて制御が実行される。この方式は、推定対称の状態量の数に比例したサンプル回数が必要なために速度制御性能を損なうこと恐れがあるが、大きな影響を呈することなく定常偏差のない良好な速度制御が行われ、軽負荷から重負荷まで効率最大運転特性が得られている。

第3章では、小容量のPMモータの高性能化速度制御法を提案している。ここで示す高

性能とは、システムの非線形性を取り除く、従来の速度制御技術、ベクトル制御法などがソフトの切り替えで可能、高速回転領域での動特性の保持、同一電流時でのトルク最大運転、効率最大運転、フィードフォワード制御による過渡応答特性の向上、などである。解析に $d-q$ 座標変換を用い、機械系の方程式を含んだ可変速度系の数式モデルを確立し、系が3次系で2入力1外乱2出力であることから制御目標として2種類取ることが出来ることを明示した。2成分に分けられたPMモータの状態方程式中、互いの成分電流が速度起電力の形で現れる干渉項を有するため、クロスフローの技法が適用され制御特性の悪化を防ぐ技術がとられている。ベクトル制御法には d 軸成分電流を零となるように制御すればよい。高速回転領域での動特性の保持のために速度とともに誘起起電圧が上昇し、駆動電源部の電圧出力限界に到達させないことが必要である。そこで d 軸成分電流が磁化作用を行うことを基本に、高速回転領域では永久磁石の主磁束に対し、それを減少させる方向の磁束を d 軸成分電流で発生させて誘起起電圧の上昇を抑えようとするもの（弱め界磁制御法）である。また、電動機トルクが、電機子電流と空隙磁束との積で表せるから、主磁束を増加させる方向の磁束成分を d 軸成分電流で発生させてトルクの増大を図ることが出来る。これを強め界磁制御法と名付け、回転子構造に突極性があればリラクタンストルクが生じ、よりその有効性が図られることが提案されている。トルク最大運転法は、回転子が突極構造に有効な制御法である。これは電機子電流が各 d 、 q 成分電流の自乗和の平方根である関係をトルク式に代入してトルク最大の条件を求め、それより d 成分電流の目標値を決定する関係式を示している。この結果、トルク増加の効果が突極比率が高いほど強く、また電機子電流値が高いほどトルクの増加率が高いことが示されている。運転効率最大制御は、無負荷損と負荷損の関係より効率最大の条件から得られ、その関係を実験式にて明かにし、 d 成分電流の目標値を決定する関係式を提示している。特徴としては、回転数の上昇とともに無負荷損中の鉄損が増加するのを防ぐように、 d 成分電流を回転数の上昇とともに負値で増加するように制御を行うものである。最後に、前章と同じ「エラーシステム」技法が制御系の構成法に用いられている。特にこの制御でフィードフォワード制御を採用した結果、速度の過渡応答特性が飛躍的に向上が図られることが示されている。

第4章では、モータの可変速システムによって生ずる電源系統への高調波電流を抑制する制御技術が示されている。従来このようなシステムの順変換回路が、どのような高調波電流を流しているかを実験とシミュレーションで示した。高調波対策をとらなければ、周辺電気機器の誤動作、通信障害や火災を引き起こすため社会問題となっており、監督省庁を通じ電力機器が発生する高調波の割合を5%程度に抑制するよう勧告されており、差し迫った課題である。先ず、高調波抑制のためにPWMコンバータを用いることを提案し、PWMコンバータ+平滑コンデンサ+インバータ+PMモータからなる回路を総合化したシステムとして扱いその数式化を行い、システム次数が6で4入力3出力2外乱であることが示されている。入力ベクトルは4種類で全て等価面積法によるパルス幅となっており、それを変調率と呼んでいる。ところで直流リンク電圧が高ければ、コンバータの動作原理上入力電流の高調波成分が増加すること、平滑コンデンサの損失が増えること、インバータの半導体素子のスイッチング損失が増えること、電動機では低速・軽負荷時では変調率が低くなり脈動トルクが増加することとなる。しかし、直流リンク電圧を低くすれば、上記の殆どは解決されるが、モータの高速域の動特性や高速応答性が失われる。そこで本論文では相対立する課題を解決する手法として「変調率最適化制御法」を提案している。これは電動機の速度制御入力電圧に応じてPWMインバータの変調率がほぼ1となるようにPWMコンバータを制御するものである。以上の考えに基づく制御手法をPWMコンバータPMモータ可変速システムに適用し、直流リンク電圧一定制御法と変調率最適化法によるシステム応答が対比して求められその有効性が示された。

第5章では各章で示された大容量機から小容量機までに亘る高性能化速度制御法の特徴

と得られた結果がまとめられ、その産業活動における有効性の意義が示されている。また、この分野の今後の研究方向について述べられている。

以上本論文では、交流機を用いた可変速システムの高性能化を図る研究目的に対し、その成果をまとめたもので、総体として研究目的の殆どが達成されたものである。

学位論文審査の要旨

主 査 教 授 土 谷 武 士
副 査 教 授 島 公 脩
副 査 教 授 長谷川 淳

学 位 論 文 題 名

回転機の高性能化速度制御法に関する研究

近年技術革新の進展に伴い、産業活動において交流機に対する高度な利用法が望まれている。例えば、大容量鉄鋼プラントなどでは直流機に代わる無整流子電動機（CLM）を用いた可変速システムや、産業用ロボット用の永久磁石界磁形同期電動機（PMモータ）可変速システムなどがある。そこでは、電力用半導体デバイスの発達に伴い、インバータ、コンバータ等を用いた交流機の可変速駆動を可能としている。また制御理論の応用の進展で、新しい特性を交流機の可変速システムに賦与することが可能となってきた。特に高速信号処理用DSPの出現は、制御理論の応用を可能とする環境をつくり出し、アナログ回路では困難な制御アルゴリズムの実行が可能となっている。これらを通じ、直流機の制御性能を超えて、ブラシ交換不要、モータの運転効率やトルク特性を向上させた交流電動機の可変速システムの実現が重要課題として認識されている。

第1章は総論で、電動機利用の社会発展や制御理論の発展、そしてパワーエレクトロニクスの進展を明らかにし、これらを通じて本研究の背景とその目的を明らかにしている。

第2章では、大容量の可変速システム用CLMの高性能化速度制御法が提案されている。機械系も含めたCLM可変速システムの数式モデルより、制御目標を2とすることが可能で、速度制御を第1の制御目標とし、運転効率最大を第2の制御目標にとることが出来き、電動機が大容量であるため省エネルギー効果は顕著となる。電動機の効率の関係式から効率を最大とする関係式が示され、電機子電流と界磁電流の関係を調節する制御アルゴリズムを示している。

しかし、CLM可変速システムでは2つの解決すべき問題がある。1つは負荷急増時などの過渡時に電機子電流急増によるサイリスタの転流失敗、第2は物理的に検出困難な回転磁極の磁束の推定である。第1については、電流コントローラ概念を導入し、転流失敗を引き起こしにくいシステムを構成できる。第2については、システムの状態方程式からサンプル周期毎の関係式を構成し、別にオブザーバを設計せずに観測可能な出力信号を用いて制御が実行される。以上の特長を有するシステムを構成し、定常偏差のない良好な速度制御が行われ、軽負荷から重負荷まで効率最大運転特性が得られることが示されている。

第3章では、小容量のPMモータの高性能化速度制御法を提案している。ここで示す高性能とは、従来の速度制御技術に加え、システムの非線形性の除去、ベクトル制御法、高速回転領域での動特性の保持、同一電流時でのトルク最大運転、効率最大運転、フィードフォワード制御による過渡応答特性の向上、などである。解析にd-q座標変換を用い、機械系の方程式を

含んだ可変速度系の数式モデルを確立し、系が3次系で2入力1外乱2出力であることから制御目標として2種類取ることが出来ることを明示した。2成分に分けられたPMモータの状態方程式中、状態変数同士による干渉項を消すために、クロスフローの技法による線形化が行われ制御特性の悪化を防ぐ技術がとられている。新しい性能を付加するにはd軸成分電流を種々制御すればよいことを数式で示している。例えば、高速回転領域での動特性の保持のためには、主磁束を減少させる方向の磁束をd軸成分電流で発生させる（弱め界磁制御法）、また電動機トルク発生の原理から、主磁束を増加させる方向の磁束成分をd軸成分電流で発生させてトルクの増大を図ること（強め界磁制御法と名付けた）があげられる。さらに、トルク最大運転法は回転子が突極構造に有効な制御法で、電機子電流が各成分電流をトルク式に代入してトルク最大の条件を求め、d成分電流の目標値を決定する関係式を示している。また、運転効率最大制御についても検討され、回転数の上昇とともに増加する鉄損を抑制するように、d成分電流を負値で増加するように制御を行うものである。前章と同じ「エラーシステム」技法が制御系の構成に用いられ、特にフィードフォワード制御の採用の結果、速度の過渡応答特性が飛躍的に向上することが示されている。

第4章では、モータの可変速システムの生ずる電源システムへの高調波電流を抑制する制御技術が示されている。高調波対策を行わなければ、周辺電気機器の誤動作、通信障害や火災を引き起こすため、高調波の割合を5%程度に抑制することが勧告されており、差し迫った課題である。高調波抑制のためにPWMコンバータを用いることを提案し、PWMコンバータ+平滑コンデンサ+インバータ+PMモータからなる回路を総合システムとして扱いその数式化を図り、システム次数が6で4入力3出力2外乱であることが示されている。入力ベクトルは4種類で全てパルス幅で表示され、それを変調率と呼んでいる。直流リンク電圧が高ければ、コンバータ入力電流の高調波成分が増加すること、平滑コンデンサの損失およびインバータのスイッチング損失が増えること、電動機が低速・軽負荷時では変調率が低くなり脈動トルクが増加することなどを数量的に示した。他方直流リンク電圧を低くすれば、上記の殆どは解決されるが、モータの高速域の動特性や高速応答性が失われる。そこで本論文では相対立する課題を解決する手法として「変調率最適化制御法」を提案した。これは電動機の世界速度制御入力電圧に応じてPWMインバータの変調率がほぼ1となるようにPWMコンバータを制御するものである。以上の考えに基づく制御手法をPMモータ可変速システムに適用し、「変調率最適化法」によるシステム応答が求められ、その有用性が示されている。

第5章では各章で示された高性能化速度制御法の特徴と得られた結果がまとめられ、その産業活動における有効性の意義が示され、また今後の研究課題・方向について指摘されている。

以上本論文では、交流機を中心とする回転機を用いた可変速システムの高性能化を図る研究目的に対し、その成果をまとめたもので、総体として本論文の表題が包括する研究目的の殆どが達成されたものである。

以上のように著者によって、制御理論を応用し大容量機から小容量機までに亘る回転機系の高性能化速度制御法が示され、それを産業活動への実現の立場から有益な新知見が示されており、同時に電気工学の今後の進歩に寄与するところ大なるものがある。

よって著者は、北海道大学博士（工学）の学位を授与される資格あるものと認める。