

氏 名	ガデリー Ahmadi Ghaderi (
学 位 の 種 類	博 士 (工学)
学 位 記 番 号	生工博甲第38号
学位授与の日付	平成19年3月23日
学位授与の条件	学位規則第4条第1項該当
学 位 論 文 題 目	Wide Range Speed Sensorless Vector Control of Synchronous Reluctance Motors with Startup Ability (起動を含むシンクロナス・リラクタンスモータの全域速度センサレスベクトル制御)
論 文 審 査 委 員	主 査 教 授 西 尾 一 政 ” 金 藤 敬 一 ” 尾 川 博 昭 ” 横 井 博 一 ” 岡 元 孝 二

学 位 論 文 内 容 の 要 旨

本論文は、同期電動機的一种であるシンクロナス・リラクタンスモータ (Synchronous Reluctance motor: 以下 SYRM) の速度センサレス手法として、磁束推定に基づいた推定手法とオンラインパラメータ同定手法を提案し、これらを組み合わせることでセンサレス運転領域を全速度領域に拡大できることを述べたものである。SYRM は回転子に永久磁石を用いていないため堅牢・安価な電動機として注目されてきている。一方でこれらの同期電動機速度制御系において、速度センサは、環境の影響を受けやすく設置箇所が制限されることがあり、また機器の重量や体積の増加の原因になるために、センサレス制御が望まれている。速度センサレス制御の手法としては、従来より種々の研究がなされているが、その中の一つに電機子電圧と電流から直接磁束を推定する方法が知られている。この手法は構造が簡単である一方で測定量の DC オフセットや測定ノイズの影響を受けること、パラメータ変動の影響を受けること等が問題となっている。特に SYRM は磁束飽和の影響を受けて電機子インダクタンスが変動し、運転条件によって推定誤差の原因となるため、異なった運転条件で満足できる速度推定を行うことが困難であった。本論文において、提出者はこのような問題点を克服するために新たな推定手法とパラメータ同定手法を提案し、センサレス制御適用範囲を拡大できることを示している。論文は以下の6章から構成されている。

1章は「序論」であり、まず研究対象とした同期電動機の可変速制御が今日の産業界で必要不可欠であること、及び電動機駆動系を使用する際の設置条件・設置環境・信頼性向上の観点などから、センサレス制御の必要性について記述している。次に同期電動機の中で SYRM における現在までの研究動向を調査しており、電動機の構造からみた発展と、センサレス制御手法の発展の両面から調査、記載している。

2章では、SYRM の構造からみた駆動原理について記述した後、モータの数式モデルについて説明をしている。次に、モデルに従って交流電動機の数式モデルについて説明を行い、ベクトル制御を行うことで様々な高精度制御が実現可能であること、可変速駆動を実現するためには回転子位置情報が必要であることを示している。

3章は、本論文で提案するセンサレス手法について2種類の方法を記述している。ここでの提案は、比較的構造が簡易であり実装が容易であると考えられている直接磁束を推定する方法に基づいている。すなわち、電流と電圧を用いた式を積分することにより磁束を計算する場合に、積分によるノイズやパラメータ誤差・DC オフセット等の影響を回避するために、可変時定数を持った等価な1次遅れ伝達関数を複数個直列に接続したフィルタで、積分動作を置き換えることができるプログラマブル・カスケードローパス・フィルタ(PCLPF)に基づいた推定方法の一種である。しかしながら従来の PCLPF

では低速時において推定に用いるフィルタゲインが増大し、推定誤差の影響が大きくなるという問題があるため、推定の際に使用するゲインの影響を少なくした修正 PCLPF (Modified PCLPF: MPCLPF)を提案している。さらに直列に挿入する LPF の個数に着目し、適切な個数について検討することで、超低速域においても推定誤差が小さくなることを明らかにし、実用に適したフィルタで構成した拡張 PCLPF (Extended PCLPF: EPCLPF)を提案している。提案手法を用いることで極低速領域においても推定精度の高い、センサレス制御が可能であることを示すと共に、その有効性を理論的に確認している。

4 章は、推定位置精度に依存しないオンラインパラメータ同定手法について述べている。位置・速度推定には電動機のパラメータが必要となるため、推定結果はこれらのパラメータ変動の影響を強く受ける。ここで必要となるのは電気系のパラメータである電機子抵抗および dq 軸のそれぞれのインダクタンスであるが、SYRM は、運転条件によってインダクタンスが変化することや、推定に必要な抵抗は電機子抵抗のみならずインバータなどの駆動部を含めた回路全体の値が必要であること、インバータ部の動作特性は非線形特性を示すことから、センサレス制御を実現するためにはセンサレス運転中のパラメータ同定が必要であることを述べている。同定手法としては推定座標軸上の電圧方程式から最小二乗法を用いてパラメータを推定する方法であるが、従来、センサレス制御を行っている場合には推定座標軸上でパラメータ推定を行うため、推定位置誤差の影響を受けていた。本論文では推定した項に含まれる位置誤差情報を取り除くことができる計算方法を適用している。さらに連続系の数式モデルを差分方程式に変換する際にブロックパルス近似を使用することで、比較的演算量を増加させずに高精度推定ができることを示し、繰り返し型の最小二乗推定を用いることで実用的な演算量でオンライン推定が可能となることを示している。

5 章は本論文で提案した上述のセンサレス制御とパラメータ推定手法の有効性を示すための実験結果を記載している。まず、提案手法を実現するための制御ブロックと、実験装置について説明を行っている。実験装置については、提案手法を容易に実現できるようにパーソナルコンピュータを用いた装置であることを説明している。実験結果は、まずオンラインパラメータ同定によって適切なパラメータが推定され、推定位置誤差が減少することを示し、以後のセンサレス制御が有用であることを示している。次に、提案した 2 つのセンサレス手法である MPCLPF、EPCLPF について様々な条件下で実験を行い、極低速域からセンサレス制御が可能であることを、センサ付きの制御結果と併記し、提案手法の有効性を示している。また提案手法を用いることでゼロ速度からの起動が可能となる起動シーケンスを提案し、実験機によって有効性を確認している。さらに、センサレス運転中に回転方向を変化させた場合の結果についても良好な結果が得られることを記載している。

6 章は「結論」であり、本研究で得られた SYRM のセンサレス制御手法と、オンラインパラメータ同定手法の成果まとめ、実用的なセンサレス制御が起動を含む広範囲な領域で実現可能なことを示している。また、今後の課題についてまとめている。

学 位 論 文 審 査 の 結 果 の 要 旨

本論文は、同期電動機的一种であるシンクロナス・リラクタンスモータ (Synchronous Reluctance motor: 以下 SYRM) の速度センサレス手法として、磁束推定に基づいた推定手法とパラメータ同定手法を提案し、これらを組み合わせることでセンサレス運転領域を全速度領域に拡大できることを述べたものである。まず、SYRM の特徴を他の種類の同期電動機と比較することで明確にし、本論文で取上げた理由を示す。また交流電動機の変速駆動の原理について説明を行い、可変速駆動を実現するためには回転子位置情報が必要であることを示す。しかし、位置検出器の取付けにより、電動機重量や体積が増加するため、設置可能な箇所が限定され、さらにセンサ情報を伝送するための配線やセンサ電源用の配線も必要となるために装置構成全体が複雑になることを示している。またセンサ信号にノイズが混入した場合には信頼性が低下するという問題もあるため、速度センサレス制御についての研究の必要性を説明している。ここで回転子位置を検出する方法としては大きく 2 通りに分類される。一つはモータモデルに基づいたものであり、検出可能な電流と電圧指令値から磁束を推定し、推定情報に含まれる回転子の位置と速度を求める方法である。他方は回転子の突極性に

着目したもので、指令値に高調波を注入し検出された電流より回転子位置を検出する方法である。前者はさらに電機子指令電圧と電流より積分により直接磁束を推定する方法と外乱オブザーバの手法を用いて誘起電圧相当分を推定する方法の2通りに分類できる。ここでは、比較的構造が簡易であり実装が容易であると考えられる直接磁束を推定する方法について新たな方法を提案している。提案手法は、積分によるDCオフセットの影響を回避するために、可変時定数を持った等価な1次遅れ伝達関数を複数個直列に接続したフィルタで置き換えるプログラマブル・カスケード・ローパス・フィルタ(PCLPF)に基づいた推定方法の一種である。しかしながら低速時には推定に用いるフィルタゲインが増大し、推定誤差の影響を大きく受けるという問題が残っていた。そこで本論文においては、LPFのゲインの計算に着目し、低速時においてもゲインの影響を少なくした修正PCLPF(Modified PCLPF:MPCLPF)を提案している。さらに直列に挿入するLPFの適切な個数を検討することにより、実用に適したフィルタ構成を持つ拡張PCLPF(Extended PCLPF:EXPCLPF)を提案するとともに、その有効性を理論的に示している。結果として起動や極低速運転を含む全速度領域のセンサレス制御を正・逆双方で実現可能であることを供試機による実験にて確認している。

一方で、位置・速度推定には電気系の電動機パラメータを用いて計算するため、推定結果はパラメータ変動の影響を強く受ける。特にSYRMは、運転条件によってインダクタンスが変化することや、インバータ等の駆動部を含めた特性は非線形特性を示すことから、センサレス制御を実現するためにはセンサレス状態でのオンラインパラメータ推定が必要となる。ここでは、パラメータ推定方法としては運転中に微小な推定用信号を付加し、繰り返し型最小二乗推定を用いている。従来はセンサレス制御によって実現される推定座標軸上でパラメータ推定を行うため推定位置誤差の影響を受けていたが、本論文では推定位置情報が不要となる計算方法を適用し、推定にブロックパルス近似を適用することで、実用的な高精度推定方法を提案している。ブロックパルス近似を用いたことで連続系モデルのパラメータをそのままの形で計算できるオンライン推定が可能となっている。提案手法は供試機による実験にてその有効性を確認している。以上まとめると、本論文ではPCLPFを拡張した新たな位置・速度推定手法と推定位置情報が不要となるオンラインパラメータ推定方法の2つの方法を組み合わせることで、SYRMの速度センサレス制御をほぼ全速度領域で実現できることを提案し、実験にて有効性を確認している。

以上述べたように論文提出者の研究は、SYRMの速度センサレス制御を実現する手法として、PCLPFに基づいた実用的な推定手法とパラメータ同定手法を組み合わせることで、起動を含む広範囲の運転が実現できることを提案し、実機によってその有効性を確認したものである。よって、提出者は、博士(工学)の学位を受ける資格があるものと認める。

なお、本論文に対して、論文調査員から(1)提案するオンラインパラメータの推定方法で推定位置誤差が減少する理由(2)回転方向を変更した場合のトルク分電流波形の応答結果について(3)EPCLPFにおけるフィルタ数の選定理由等、種々の質問があったが、提出者によって適切な回答がなされた。また、公聴会においても、多数の出席者があり、(1)低速度センサレス駆動の産業応用例についての質問(2)提案手法の他の電動機への適用についての質問等があったが、いずれも提出者によって適切な回答が行われ、質問者の理解が得られた。

以上により、論文調査及び最終試験の結果に基づき、審査委員会において慎重に審査した結果、本論文が、博士(工学)の学位に十分値するものであると判断した。