

令和 2 年 6 月 5 日現在

機関番号：24403
研究種目：基盤研究(C)（一般）
研究期間：2017～2019
課題番号：17K06310
研究課題名（和文）シンクロナスリラクタンスモータの自律調整型センサレス高効率ドライブシステム

研究課題名（英文）Sensorless High-efficiency Drive System with Autonomous Adjustment for Synchronous Reluctance Motors

研究代表者
森本 茂雄（MORIMOTO, Shigeo）
大阪府立大学・工学（系）研究科（研究院）・教授

研究者番号：00210188
交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 3,700,000円

研究成果の概要（和文）：永久磁石を使用しない高効率モータとして期待されているシンクロナスリラクタンスモータにおいて、自律的に制御器を調整できるセンサレスドライブシステムについて検討した。停止から高速域まで位置センサを使用せずに安定に駆動できるセンサレス制御システムを構築した。そのシステムで必要となるモータパラメータを運転前および運転時に推定する手法を開発し、制御システムに適用できるようにした。

研究成果の学術的意義や社会的意義

シンクロナスリラクタンスモータは、磁気飽和の影響が大きく、非線形要素が多いことが高性能制御を実現する上での課題となっている。本研究により、モータパラメータを推定して制御器の自動調整により高効率制御やセンサレス制御が実現できる。このシステムの適用により、高効率なシンクロナスリラクタンスモータの適用が拡大し、その結果省エネルギー化が推進できる。

研究成果の概要（英文）：In a synchronous reluctance motor, which is expected as a high-efficiency motor that does not use permanent magnets, a sensorless drive system that can adjust the controller autonomously was investigated. The sensorless control system that can be driven stably from the standstill to the high-speed range without using a position sensor was proposed. A estimating method for the motor parameters required for the system before and during operation was proposed, and the estimated parameters can be applied to the control system.

研究分野：電気機器工学，パワーエレクトロニクス

キーワード：シンクロナスリラクタンスモータ センサレス制御 パラメータ同定

様式 C - 19、F - 19 - 1、Z - 19 (共通)

1. 研究開始当初の背景

モータによって消費される電力は、我が国の全消費電力の50%以上、産業用モータによって消費される電力は産業部門の電力消費量の約75%を占めるといわれている。こうした状況を考慮し、日本では省エネ法に基づくトップランナー制度が導入され、産業用モータの効率について目標基準のクリアが義務づけられ、その目標基準値はIE3(プレミアム効率)相当である。海外でも最低エネルギー消費効率基準を強化する傾向にある。今後は、IE4(スーパープレミアム効率)さらにIE5(最高効率基準)へと高効率化が求められる方向にある。IE4やIE5を満たす高効率モータとして、従来の誘導モータに代わりシンクロナスリラクタンスモータ(SynRM)が注目されており、一部実用化も進められている。

SynRMは、安定運転のために位置情報(位置センサの設置)が必要であり、モータパラメータに基づいて運転状態に応じて適切に電流ベクトルを制御することで高効率運転を実現できる。SynRMの高効率制御には、位置センサの設置、モータパラメータの把握、最適電流ベクトルの導出が必要となり、比較的簡単な誘導モータのドライブシステムと比べて構成が複雑となり、結果的にドライブシステムが高価なものになること、それにより高効率モータの普及の妨げになることが課題である。また、SynRMは、磁気飽和の影響が大きく、非線形要素が多いことが高性能制御を実現する上での課題となっている。

2. 研究の目的

国内における産業部門の電力消費の約75%を占めるといわれている産業用モータにおいて、次世代の高効率モータとして期待されているシンクロナスリラクタンスモータの普及およびそれによる省エネの推進を目指して、構成が簡単で調整要素が極めて少なく、汎用性も高い自律調整型センサレスドライブシステムを構築する。具体的には、(1)位置・速度センサレス制御、(2)モータモデルのパラメータ推定、(3)推定パラメータに基づく高効率制御を実現するドライブシステムを構築し、任意のシンクロナスリラクタンスモータに対して、センサレスで自動的に高効率運転を実現するシステムの完成を目指す。

3. 研究の方法

(1) 位置・速度センサレス制御システム

位置・速度センサを設置せず、モータの電圧・電流情報より位置・速度を推定する。中高速度域ではセンサレス制御用のモデルとして拡張誘起電圧を用いるが、SynRMは磁気飽和によってインダクタンスが大きく変化するためモータモデルにはインダクタンスの変化を考慮できるようにする。停止・低速時にはインダクタンスの位置依存性を利用して位置を推定する。これらの手法を速度に応じてスムーズに切り替え、全速度域でセンサレス制御を実現する位置・速度推定手法を開発する。

(2) モータモデルパラメータの推定

磁気飽和の影響が顕著なSynRMでは、モータモデルに含まれる各種パラメータが運転状態によって大きく変化する。センサレス制御の高精度化やSynRMの高効率制御の実現にはモータモデルパラメータの把握が重要であるため、モータモデルパラメータのオフラインおよびオンラインパラメータ推定法を開発する。

(3) 推定パラメータに基づく高効率制御とセンサレス制御

SynRMの高効率運転条件(最適電流ベクトル)は、運転状態によって異なるため、推定したモデルパラメータを基にした最適電流ベクトル決定手法を開発する。また、推定パラメータをセンサレス制御にも利用して推定精度の向上を図る。

上記の研究においては、シミュレーション及び実験による検討により、提案システムの性能検証、課題抽出および改良を加えていく。

4. 研究成果

(1) SynRMの全速度領域における位置・速度センサレス制御

停止・低速回転領域においては高周波電圧印加方式、中・高速回転領域においては拡張誘起電圧推定方式により、位置と速度を推定し、推定方式切り替え領域においては両推定方式で得た推定位置誤差に重み関数をかけることで、全速度領域における速度・位置センサレス制御システムを検討した。

モータパラメータを必要とする拡張誘起電圧推定方式においては、磁気飽和によって変化するd軸インダクタンス L_d 、q軸インダクタンス L_q の磁気飽和モデルを速度・位置推定部およびモータ制御部で用いた。

図1に定格の10%の負荷を与え、速度指令を 0 min^{-1} - 1000 min^{-1} とランブ的に変化させた時の実験結果を示す。このとき、拡張誘起電圧推定方式は 400 min^{-1} 以上で推定を行い、高周波電圧印加方式は 700 min^{-1} 以下で推定を行っている。また 450 min^{-1} から 650 min^{-1} の間に重みをかけ推定方式を切り替えている。図1(b)から加速開始時に最大で約 60 min^{-1} の速度推定誤差が生じているが、定常状態では0となっていることが確認できる。図1(c)から位置推定誤差は加速開

始時に最大で約 15° 生じ、定常状態で約 5° の誤差が生じているが、速度特性に大きな影響はない範囲の誤差である。推定方式切り替え領域ではスムーズに推定方式の切り替えが行われていることも確認できる。このように全速度領域におけるセンサレス制御が実現できた。

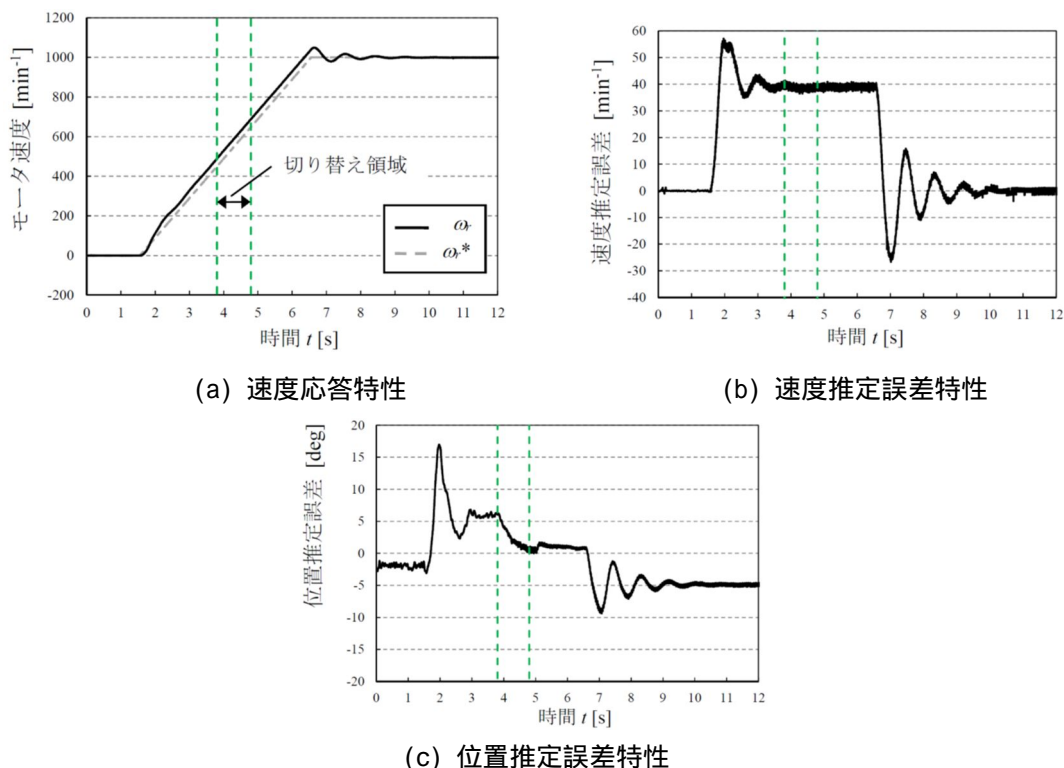


図 1 センサレス制御の運転特性

(2) モータモデルパラメータの推定

磁気飽和の影響を考慮した SynRM の全パラメータを逐次最小二乗法により推定する手法を検討した。SynRM では、一般に磁気飽和により d 軸インダクタンスが大きく変化する。磁気飽和がある場合、インダクタンスとして次式で定義される平均インダクタンス L_{ave} と局所インダクタンス L_{inc} を考慮する必要がある。

$$L_{ave} = \frac{\Psi}{i}, L_{inc} = \frac{d\Psi}{di}$$

インダクタンスの同定モデルとして、電流一定時を想定した定常モデルと電流変化を想定した過渡モデルを使い分けることで平均インダクタンスと局所インダクタンスが同定できる。しかし、誘起電圧が生じない停止状態では定常モデルによる平均インダクタンスの同定は不可能であるため、停止時の同定できる過渡インダクタンスを用いて平均インダクタンスを計算する手法を提案した。これは、複数の電流値で推定した局所インダクタンス L_{inc} を積分して磁束鎖交数を推定し、それをもとに平均インダクタンス L_{ave} を計算する方法である。これにより、停止状態においても平均インダクタンスを含む全モータパラメータの推定が可能となった。

図 2 に磁気飽和の影響が大きい d 軸インダクタンスの停止状態における同定結果を示す。 L_{d_inc} は過渡同定モデルを用いて逐次最小二乗法により同定した局所インダクタンスであり、 L_{d_ave} は L_{d_inc} より計算した平均インダクタンスである。全ての電流値において良好な同定結果が得られていることが確認できる。

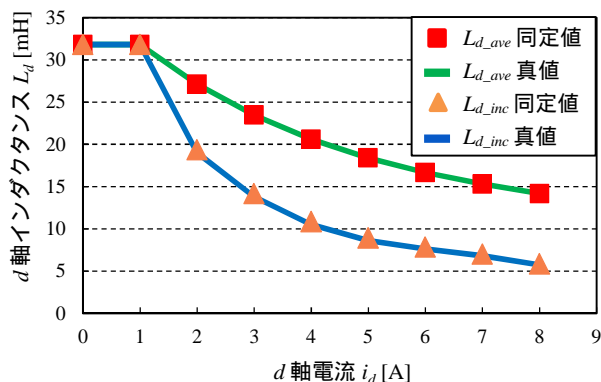


図 2 d 軸インダクタンス同定特性

(3) 推定パラメータに基づく高効率制御とセンサレス制御

上記(2)の手法で推定したモータパラメータを用いて高効率運転を実現する MTPA(最大トルク/電流)の条件を導出する。SynRM のトルク式は、

$$T = P_n (L_d - L_q) i_d i_q = \frac{1}{2} P_n (L_d - L_q) I_a^2 \sin \alpha$$

ただし、 $i_d = I_a \sin \alpha$, $i_q = I_a \cos \alpha$

で与えられるが、インダクタンスは、電流値によって変化する。そこで、多数の電流条件で同定したインダクタンスのデータをもとに、d,q 軸電流に対するインダクタンスマップを作成する。ある電流値 I_a において電流位相 α を変化してトルク - 電流位相特性を計算し、トルクが最大となる電流位相 (d,q 軸電流値) を求める。このとき、電流位相によって変化するインダクタンスを考慮する。このようにして求めた電流位相が I_a における MTPA 条件である。 I_a の値を変えて同様に MTPA 条件が算出できる。このように推定したインダクタンスを用いて、磁気飽和を有する SynRM の MTPA 条件を導出することができた。

また、モータパラメータを必要とする拡張誘起電圧推定方式のセンサレス制御において、一定のインダクタンスを使用すると運転状態によって位置推定精度の悪化や場合によって不安定になるが、同定したパラメータ、特に電流によって変化するインダクタンスの同定値を使用することで、センサレス制御における安定性の向上や推定精度の改善が可能となる。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計0件

〔学会発表〕 計5件（うち招待講演 0件 / うち国際学会 0件）

1. 発表者名 藤原俊吾, 森本茂雄, 井上征則, 真田雅之
2. 発表標題 磁気飽和を考慮したシンクロナスリラクタンスモータの停止時における全パラメータ同定法
3. 学会等名 平成30年電気学会産業応用部門大会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 藤原俊吾, 森本茂雄, 井上征則, 真田雅之
2. 発表標題 磁気飽和を考慮したSynRM の駆動時におけるパラメータ同定法
3. 学会等名 平成30年電気関係学会関西連合大会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 久畑篤紀, 森本茂雄, 真田雅之, 井上征則
2. 発表標題 推定位置誤差を利用した同期リラクタンスモータの全速度領域における速度・位置センサレス制御
3. 学会等名 平成30年電気関係学会関西連合大会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 久畑篤紀, 森本茂雄, 真田雅之, 井上征則
2. 発表標題 磁気飽和を考慮した同期リラクタンスモータの速度・位置センサレスMTPA制御
3. 学会等名 平成31年電気学会全国大会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 藤原俊吾, 森本茂雄, 井上征則, 真田雅之
2. 発表標題 SynRMの停止時における磁気飽和を考慮したインダクタンス同定法
3. 学会等名 平成30年電気学会全国大会
4. 発表年 2018年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

6. 研究組織

	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
研究分担者	井上 征則 (INOUE Yukinori) (50580148)	大阪府立大学・工学(系)研究科(研究院)・准教授 (24403)	
研究分担者	真田 雅之 (SANADA Masayuki) (90264803)	大阪府立大学・工学(系)研究科(研究院)・准教授 (24403)	