

平成 30 年 6 月 14 日現在

機関番号：13701

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2015～2017

課題番号：15K05937

研究課題名(和文)電気自動車、ハイブリッド自動車用スイッチトリラクタンスモータの高精度トルク制御

研究課題名(英文)High accuracy torque control of switched reluctance motors for EV and HEV use

研究代表者

内藤 治夫 (NAITOH, Haruo)

岐阜大学・工学部・教授

研究者番号：00324278

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)：スイッチトリラクタンスモータ(SRM)はレアアースが必須の永久磁石を用いないので、コストの点で優位だが、原理的に発生トルクとモータ電流が比例しないため、制御が困難である。本研究では、SRMの用途をEV、HEVに限定し、これらにふさわしいSRMの制御方式を探求した。その結果、磁束弱め制御をはじめとして最大トルク制御、最大効率制御などの方式を確立した。また、これら制御を運転状況に応じて適切に切り替えて、全動作範囲で良好な運転を可能にした。

研究成果の概要(英文)：Switched reluctance motors (SRMs) are advantageous in cost because they do not use permanent magnet which inevitably requires rare earth metals. SRMs are, however, quite difficult to be controlled because their input current is not proportional to generation torque. The study has searched preferable controls for SRMs limiting their use in EV and HEV. As a result, field weakening control, maximum torque control, maximum efficiency control, and so on have been established. Appropriate change of the controls has provided much better drive performance over all operating range.

研究分野：パワーエレクトロニクス

キーワード：スイッチトリラクタンスモータ FEM解析 EV、HEV トルク制御 弱め磁束制御 ドライブシミュレータ

1. 研究開始当初の背景

スイッチトリラクタンスモータのトルクは、その発生原理から、生来的に電流に比例しない。これは従来のモータである直流電動機、ベクトル制御を施した誘導電動機・同期電動機・永久磁石電動機 (SPM) とは全く異なる点である。このため、電流を d 軸電流 (界磁電流成分) と q 軸電流 (電機子電流成分) に分離することは、原理的には不可能である。したがって、従来のモータのようにトルク制御を電機子電流成分の制御で代用し、トルク検出の代わりに電流センサによる電流検出で済ませることも不可能である。「トルクセンサ (ここで言う「センサ」は、試験場でのみ使用されるトルク測定器ではなく、実機に装着され、製品の一構成部品として実用に供せられるもの)」は現実的には存在しないことに留意すれば、スイッチトリラクタンスモータのトルク制御 (フィードバック制御) は不可能である。スイッチトリラクタンスモータが今日に至っても実用事例が数少ないのは、振動・騒音が大きいこともあるが、トルクが、上記の理由により、精度良く制御できない点も大きい。数少ない事例に於いても、例えばダイソンの掃除機のように 1 ~ 2 段階程度の速度で回れば良く、各段階の速度も負荷 (吸引状態) に応じ大幅な速度の変化を許容するような、高精度の制御を必要としない用途しかない。

現在、例えば電気自動車やハイブリッド自動車のように、高精度・小型軽量・高効率が求められる用途では、永久磁石モータが使用されている。永久磁石にはネオジウム-鉄-ボロン磁石 (Ne-Fe-B: 以下、Nd 磁石と略記) が使われている。Nd 磁石の材料では、Nd そのものと、磁石の名には現れないが高温でも保磁力を高めるには必須のディスプロシウム (Dy) がレアアースである。現在、我が国はレアアースを 100% 中国に依存している。昨今の中国のレアアース禁輸措置で明瞭と

なったように、Nd 磁石は政治・国際情勢の面で極めて脆弱である。加えて、禁輸問題が生じる以前から、価格高騰 (数値例: レアアース 磁石 価格 2009/4:130\$/kg 2010/4:280\$/kg) が続いている。さらには、ハイブリッド自動車最大手のトヨタは、主要車種へのハイブリッド車展開を進める方針である。これに基づく需要予測によれば、トヨタ社で Nd および Dy の現在の確認済埋蔵量を十数年で使い尽くすと推定している。つまり埋蔵量の面でも Nd 磁石は極めて悲観的である。

以上の状況から、永久磁石を必要としないスイッチトリラクタンスモータを電気自動車やハイブリッド自動車等への適用に耐える程に、高精度に制御する方式の確立が急務である。

2. 研究の目的

本研究の開始時点までに、瞬時値にて所望のトルク制御、および、各制御周期ごとの平均値での電流制御を確立したので、これらを融合・発展させてスイッチトリラクタンスモータの高精度トルク制御を実現する。制御動作領域としては、これまで力行かつ定トルク領域 (起動から基底速度までの界磁弱めを適用しない領域) のみであったが、負荷機械として EV, HEV を想定し、界磁弱め領域および回生領域までの全領域をカバーできるようにする。

負荷トルク変動 (外乱) に即応できる高精度トルク制御には、外乱に対応した所用トルクの迅速で精密な発生が不可欠である。先述のようにスイッチトリラクタンスモータでは電流とトルクに比例関係が成立しないので、直流電動機などのような単なる電流制御での代替では極めて不十分である。所用トルクに見合った電流の定式化は、スイッチトリラクタンスモータでは大半の動作領域にて磁気飽和が生じるため困難である。本研究の究極の目標は、スイッチトリラクタンスモータ

タの動作状況に即して所用トルク発生させる制御器を、テーブル参照を基本として作製することである。

制御パラメータとしては、従来の電圧、電流、回転速度に加え、これまでスイッチトリラクタンスマータの各相の通流開始角（オン角）と停止角（オフ角）も積極的に制御パラメータとして活用することを目指す。これらは通常一定値とされ、制御に用いられた事例は殆ど無い。

定トルク領域では、基本的にはこれまでの研究成果を適用する。この領域では、最大トルク駆動制御を実施するためのテーブルを探索する。

界磁弱め領域の根本は、基底速度以上にて逡減トルク特性の負荷が必要としない分だけ、モータの許容最大トルクを絞りひいては逆起電力を抑え、限度のある電源電圧でも電流を流せるようにすることにある。この領域ではオン角とオフ角の絶対値および間隔も適切に制御に取り入れる、つまりテーブルの引数に加える。

回生運転では、制動力制御と電源の充電制御を調和させる必要がある。制動力制御では、制動力の確保だけでなく、運転手への違和感のなさ、乗員の乗り心地も考慮に入れる必要がある。充電に於いては、電池の種類（トヨタはニッケル水素電池、メルセデスベンツなどはリチウムイオン電池）に応じた最適充電電圧の制御と並行して最高効率運転をする制御法を確立し、これをテーブルに反映させる。

以上の制御の土台となる各制御パラメータを引数とする発生トルクのテーブルは、FEM 解析により作製する。その際スイッチトリラクタンスマータの理論的特性解析に基づきある程度探索領域を絞り込み、効率化を図る。

上記のすべて種類のテーブル化の工程において、作成したテーブルの精度は、実験によ

り検証を逐次並行して行う。

3. 研究の方法

- ・実験に供するモータに付き高精度の FEM 解析を行い、実験による検証と併せて、各制御パラメータと発生トルクの間関係を把握する。
- ・界磁弱め領域に於いて、特にオン角・オフ角と逆起電力および発生トルクの間関係を明らかにする。この領域内での最適な許容最大トルクと回転速度の間関係を探求する。従来の方式では、反比例の間関係にしているが、これは安易な便法に過ぎず最適とは限らない。
- ・回生領域での制動・充電制御方式を確立する。
- ・各領域間の滑らかな移行を実現する方式を確立する。

研究成果の実用を想定し、EV, HEV 出荷時の個体のテーブル作製に付き、実機実測データと FEM 解析データの連成チューニングプログラムを開発する。

4. 研究成果

4.1. スイッチトリラクタンスマータとそれに連結した負荷モータ（SPM 型永久磁石モータ）よりなる模擬実験装置の開発を終了した。

4.2. 負荷モータにより EV および HEV の自動車としての負荷特性を模擬するため、自動車の簡易走行パターンに対応した負荷トルクパターンを策定し、この負荷を発生するよう負荷モータを制御するシミュレータを開発した。

4.3. 自動車エンジンモデル、オルタネータ、およびバッテリーより構成されるバッテリー充電システムの、シミュレーション言語 VHDL -AMS を使用したシミュレータの基本アルゴリズムを開発した。このシミュレー

たと、当研究で開発した回路シミュレータである「回路解く蔵」とを連成させるための、VHDL-AMS 言語と、「回路解く蔵」のネットリスト（C 言語）の互換用プログラムを開発した。

4.4. 4.2.の制御アルゴリズムを 1. の模擬試験装置のコントローラにインストールし、総合試験装置を作り上げた。

4.5 .弱め磁束制御単独の制御アルゴリズムの策定：従来の制御方式である双曲線の許容最大動作ラインより下での最適動作点を、FEM解析および実験により探索し、テーブル化した。このテーブルをオンラインで検索することにより、高速運転時の弱め磁束制御を3. の試験装置で実施し、一定の効果を確認した。今期間の研究においては、上記のようにテーブルを用いたが、これを理論的に定式化することは、今後の研究課題である。

並行して、最高速近傍での動作点にて、1パルスモード制御の併用も行い、良好な動作を確認した。

4.6 .総合試験：EV, HEVのドライブ用として、各動作領域に於ける最適な制御方式、具体的には、最大トルク制御、最大効率制御、最適制動力制御、最適充電制御および弱め磁束制御方式を1. の模擬試験装置でそれぞれ適用した駆動試験を実施し、おのこの効果を確認した。各制御方式の切替期間に於いて、モータ電流や発生トルクなどに多少の動揺が生じる場合があることを確認している。これは軽微なものであるが、その解消方法は今後の研究課題である。

また、今研究期間を通じ、各段階での実験における各種改良、特に高速回転時で電動機（スイッチトリラクタンスモータ）の逆起電力が大きくなったときでも正の電機子電流を流せるように、モータ駆動用インバータの

電圧を昇圧する方式や、スイッチトリラクタンスモータの発生トルクの脈動を抑制する回路方式、制御方式も開発した。

5 . 主な発表論文等

〔雑誌論文〕(計 3 件)

石川 裕記, 今井 崇敬, 内藤 治夫, スイッチングにともなう電流脈動を抑制するスイッチトリラクタンスモータ駆動回路、電気学会論文誌、査読有、2017, Vol.137, No.10, pp.806-814

DOI:

<https://doi.org/10.1541/ieejias.137.806>

石川 裕記, 内藤 治夫, 昇圧形駆動回路によるスイッチトリラクタンスモータのトルク脈動抑制、電気学会論文誌、査読有、2017, Vol.137, No.10, pp.791-798

DOI:

<https://doi.org/10.1541/ieejias.137.791>

Yuji Ishihara, Makoto Sugiura, Hiroki Ishikawa, Haruo Naitoh, Improving the Efficiency of Switched Reluctance Motors using a Step-Skewed Rotor, IEEJ Journal of Industry Applications, 査読有、2015, Vol.4, No.4, pp.445-453

DOI:

<https://doi.org/10.1541/ieejjia.4.445>

6 . 研究組織

(1)研究代表者

内藤 治夫 (NAITOH, Haruo)

岐阜大学・工学部・教授

研究者番号：00324278

(2)研究分担者

石川 裕記 (ISHIKAWA, Hiroki)

岐阜大学・工学部・准教授

研究者番号：90273119