

機関番号：13701

研究種目：基盤研究（C）

研究期間：2008 ～ 2010

課題番号：20560264

研究課題名（和文） ハイブリッド自動車のドライブトレインの最適設計とACサーボモータのドライブ制御法

研究課題名（英文） Optimum design of hybrid vehicle drive train and drive control of AC servo motors

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

研究成果の概要（和文）：

ハイブリッド自動車用の埋込型永久磁石モータ（IPM）のリラクタンストルクを含めた制御法を考案した。特に、高速領域での制御法は、弱め磁束制御で、フィードバック制御による方法を立案した。このフィードバック制御により最高効率動作点域で運転する制御方法を確立した。実際の有効性は、シミュレーションおよび実験で検証済みである。

フィードバック制御により、動作状況に適した弱め磁束制御を可能にできた。

リラクタンスマータ（SRM）の制御用としてモデル規範適応制御（MRAC）を確立し、これをIPM制御用に改良した。シミュレーションと実験により、良好な制御を検証した。

研究成果の概要（英文）：

A new torque control for interior-permanent magnet motors (IPM) has been established for hybrid-vehicle drive applications. Especially in a high speed operating region, a flux weakening control has been established on the basis of feedback control. The validity has been confirmed by simulation and experiment. The nonlinear problem of reluctance torque is, therefore, vital to the motors as well. The table is made in the factory before delivery. The task is very costly.

The MRAC-based control cannot directly control torque. A straightforward solution might be brought with direct detection of generated torque in an on-line manner.

交付決定額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2008年度	1,400,000	420,000	1,820,000
2009年度	1,300,000	390,000	1,690,000
2010年度	700,000	210,000	910,000
年度			
年度			
総計	3,400,000	1,020,000	4,420,000

研究分野：電動機の可変速駆動

科研費の分科・細目：電気電子工学・電力工学・電力変換・電気機器

キーワード：ハイブリッド自動車、ドライブトレイン、ACサーボモータ、ドライブ制御法
モデル規範適応制御、埋込型永久磁石モータ

1. 研究開始当初の背景

ハイブリッド自動車に用いるACサーボモータおよびその制御には以下の特徴がある。

1. 車載するためモータをコンパクトにしたいのでモータの鉄心の量を可能な限り少なくする。
2. 上記1.と同じ目的で、モータ体格に対して出力トルクをなるべく大きくするため、永久磁石モータ本来の磁石トルクに加えてリラクタンストルクも活用できる埋め込み磁石形永久磁石モータ（Interior Permanent Magnet:以下IPMモータと略記）を採用する
3. 速度範囲がゼロ速から高速回転まで及ぶ
4. エンジンとの駆動力・制動力の分担制御が必要 などである。
上記の特徴に起因して、下記の制御上の課題がある。
 - A. 鉄の量が少いので磁気飽和を生じ易く、インダクタンス値が動作状態に依存して大きく変動する。この変動はACサーボモータに必須の非干渉制御を困難にする。非干渉制御を適用しないか適用しても不適切であると、モータトルクに大きな振動が生じ、高速になるほど大きい。
 - B. リラクタンストルク成分はd軸電流（界磁電流成分）とq軸電流（電機子電流成分）の積に比例するので、従来の磁石トルクだけの場合の制御法が適用できない。
 - C. 高速回転領域ではモータの逆起電力が大きいので、無対策であると、車載の電源の電圧（バッテリー電圧=モータ駆動用のインバータの入力電圧：一定値）を上回り運転不能となる。
 - D. エンジンとの駆動力・制動力の分担制御に関しては、ハイブリッド自動車の用途により、設計思想が大きく異なる。用途に適した分担制御法の

確立が必要である。

現状技術は以下の通りである。まず日野自動車^[1]についてD.から説明する。大型車両用とはいえ、車載モータに大出力は期待できず、エンジンが主でモータは補助として位置づけている。モータは発車時のアシスト（トルクの追加）と停止時のリターダー（エンジンプレーキ）の機能だけを發揮する。モータの回転速度範囲は低速域に限定され、上記A. C.の問題は小さい。B.もIPMモータを採用していないので問題はない。これに対し比較的軽量な乗用車用を対象とするトヨタでは、エンジンとモータの出力はほぼ同等である（第2世代プリウスの例：エンジン:40~50kW、モータ:50kW）。このため日野とは大きく異なり、エンジンは自動車の動作状態になるべく無関係に、エンジン効率最大のほぼ一点の動作点で稼働させる。モータはIPMとし、実際に自動車が要求するトルクとの乖離をモータが分担するのである。モータは全速度範囲の稼働が必要で、上記A. B. C.がそのまま大問題となる。トヨタの現状の技術レベル^[2]は以下の通りである。A.の非干渉制御は適用を断念しており、計測に基づく補正值をテーブル化して対応している。B.に関しては各動作点で最大トルク運転となる電流の位相進み角（以下 β 角と略記）と電流の実効値の関係をこれも実機での計測によりテーブル化し制御している。C.に関しては、従来の弱め磁束制御を基本とし、バッテリー電圧を昇圧チョッパによるPAM制御で昇圧し（第2世代プリウスの例：200V⇒500V）、さらにインバータでは過変調PWM制御および1パルス（矩形波）制御でモータ印加電圧を確保している。弱め磁束の程度に応じたPAM制御での昇圧率の設定はこれもテーブルで対応している。1パルス制御では電圧の大きさは飽和して制御不能であるため位相のみの制御を行う。このように多種の制御法を自動車の動作状態に応じて切替えているため制御の切替え判定が複雑を極め、

切替え時のショックも小さくない。この切替えもテーブルで対応している。以上、制御の大半をテーブルで対応しているため、テーブルのサイズが膨大でその作製の多大な時間を要し、ハイブリッド自動車のコストに大きく影響している。さらに、テーブルのデータ間での補完に伴う誤差、カバーしていない動作状態への対応なども問題として残っている。

2. 研究の目的

本研究は乗用車向けのハイブリッド自動車に適用する永久磁石 AC サーボモータの制御技術に関する。主旨は、現在、製品化されているハイブリッド自動車における永久磁石 AC サーボモータドライブ制御の主要な技術課題を克服することである。それらは、(1)モータとエンジン間の最適トルク分担法の確立

(2)高速運転時のモータ印加電圧の確保方式の確立

(3)リラクタンストルクを含めた総合モータトルクの最適／適応制御法の確立

である。

現状のハイブリッド自動車のモータ制御が複雑・膨大なテーブルを用いるのに対し、本研究は、理論的に裏打ちされた、性能向上・コスト削減・普及拡大など実用的にも意義が大きく、地球環境問題緩和の一助としても有意義な、ハイブリッド自動車のパワートレインの制御法および設計法を確立する。

(1)モータとエンジン間の最適トルク分担法の確立

(2)高速運転時のモータ印加電圧の確保方式の確立

(3)リラクタンストルクを含めた総合モータトルクの最適／適応制御法の確立

である。

現状のハイブリッド自動車のモータ制御が複雑・膨大なテーブルを用いるのに対し、本研究は、理論的に裏打ちされた、性能向上・コスト削減・普及拡大など実用的にも意義が大きく、地球環境問題緩和の一助としても有意義な、ハイブリッド自動車のパワートレインの制御法および設計法を確立する。

3. 研究の方法

(1)発電機によるエンジン最高効率動作点の推定方式の確立

①エンジン-発電機系シミュレータの開発

②エンジン最高効率動作点を発電機により探索・推定する方式の確立

(2)モーターエンジンドライブトレインのグランドデザイン

(1)で得られた結果に基づき、モータとエンジンとの駆動力・制動力の分担制御方式の確立

①エンジン最高効率動作点の存在範囲に応じたモータの最適動作範囲を確定する

②モータの最適動作範囲に応じた弱め磁束制御範囲の確定

③弱め磁束制御範囲と高速域での加速力仕様から、所用最大印加電圧を確定

④以上の結果を反映した、発進、加速、定常走行、高速走行、制動、停止、急加減速など自動車としての全動作状態のそれぞれのモードに応じた分担制御の方針を策定

(3)ハイブリッド自動車ドライブ系全体のシミュレータ開発

①既に開発済みのIPMモータと1)のシミュレータの合体

②上記の合体版シミュレータに2)で策定した全動作状態の各モードに応じた分担制御を組み込むプログラムの開発

(4)模擬実験装置の製作

①IPMモータとそれに連結した負荷機械(ベクトル制御誘導電動機)よりなる模擬実験装置にて、エンジンの動作を誘導電動機で模擬するための制御プログラムの開発

②ガソリンエンジンの動作特性データとの比較による検証と制御プログラムの改良

③模擬アクセルペダルと模擬ブレーキペダルを介したIPMモータの加減速シミュレータの製作

(5)モデル規範適応制御によるリラクタンストルク成分まで含めた電流／トルク制御方式の確立

①第1段階：インダクタンスの磁気飽和を考慮しない条件での制御アルゴリズムの開発

②第2段階：インダクタンスの磁気飽和を

考慮した条件での検証と改良

(6) インダクタンスの磁気飽和を考慮した条件での非干渉制御方式の確立

(5) のモデル規範適応制御で、非干渉化もカバーできるかどうかのシミュレーションおよび実験による検証

(7) 高速領域での制御法の確立

① 弱め磁束制御単独の制御アルゴリズムの策定

② 弱め磁束制御とモータ印加電圧の最大化つまり 1 パルスモード制御の併用制御方式の確立

4. 研究成果

ハイブリッド自動車用の埋込型永久磁石モータ (IPM) のリラクタンストルクを含めた制御法を考案した。特に、高速領域での制御法については、弱め磁束制御で、従来のオープンループ制御ではなく、フィードバック制御による方法を立案した。このフィードバック制御により最高効率動作点域で運転する制御方法を確立した。この制御方法に於いては、磁束指令値の最適値を算出するアルゴリズムを考案した。実際の発生磁束を算定・フィードバックして指令値と比較するフィードバック方式の有効性は、シミュレーションおよび実験で検証済みである。

フィードバック制御が可能になったことにより、従来、フィードフォワードで行っていた、単純に双曲線の許容最大動作ライン以下の領域での運転法に比べ、実際の動作状況に適した弱め磁束制御を可能にできた。

総合試験として、研究期間中の新規の各種制御を協調して実施する方式を検証し、良好な結果を得た。

リラクタンスマータ (SRM) の制御用としてモデル規範適応制御 (MRAC) を確立し、これを IPM 制御用に改良し適用した。シミュレーションと実験により、良好な制御が実現できることを検証した。これにより、従来、複雑で大容量を要し、高コストの原因でもあったテーブルに基づく制御法を不要にできた。

5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文] (計 1 件)

[1] SRM の電氣的伝達関数とそれに基づく電流制御系の設計法 (石川裕記, 小牧亮子, 内藤治夫, 山羽聡, 加藤大貴), 電気学会論文誌 D, Vol. 128, No. 8, pp. 1029-1036 (2008),

査読有

[学会発表] (計 8 件)

[1] A current controller for a switched reluctance motor based on model reference adaptive control, H. Naitoh, and H. Ishikawa, Proceedings of the Symposium on Power Electronics, Electrical Drives, Automation and Motion, pp. 1270-1275, 2010, 査読有

[2] Higher Harmonic Currents Reduction for Interior Permanent Magnet Synchronous Motors (T.Yoshida, T. Kamejima, H. Ishikawa, and H. Naitoh), Proceedings of the International Power Electronics Conference Sapporo, pp.1071-1076, June 22-24, 2010., 査読有

[3]: 「移動平均法を用いた SRM の電流制御系の設計」 (岡本正義, 石川裕記, 内藤治夫), 平成 22 年電気学会産業応用部門大会講演論文集[YPC], Y-116, p. 116, 2010, 査読有

[4]: 「SRM の速度制御系における電流応答の高速化」, (中島一憲, 石川裕記, 内藤治夫) 平成 22 年電気学会産業応用部門大会講演論文集[YPC], Y-117, p. 117, 2010, 査読有

[5] Path Generation with Clothoid Curve Using Image Processing for Two-Wheel-Drive Autonomous Mobile Robots, Hiroki Ishikawa, Katsuki Noguchi, Ryutaro Maki, Haruo Naitoh, Preprints of the 9th IFAC Symposium on Robot Control (SYROCO '09), pp.657-662 (2009), 査読有

[6] Novel Speed Control System with Flat Torque Control for Switched Reluctance Motor Drives (Hiroki Ishikawa, Paudel Rishab, Akinori Tsutsumi, and Haruo Naitoh), The 12th International Conference on Electrical Machines and Systems(ICEMS2009), 2009

(CD-ROM). , 査読有

[7]移動平均法を用いた SRM の電流制御系の設計(岡本正義・石川裕記・内藤治夫)、平成 19 年電気学会産業応用部門大会講演論文集[YPC], Y-36, 2009, 査読有

[8] 可変電圧源による SRM のトルク脈動抑制制御法(今井崇敬・石川裕記・内藤治夫)平成 19 年電気学会産業応用部門大会講演論文集[YPC], Y-37, 2009, 査読有

〔図書〕(計 2 件)

[1]パワーエレクトロニクスハンドブック、内藤治夫、他、オーム社、2010 年

[2]永久磁石モータドライブ制御システム～設計法と実用設計～、内藤治夫、他、トリケップス、2008年

〔産業財産権〕

○出願状況 (計 0 件)

名称 :

発明者 :

権利者 :

種類 :

番号 :

出願年月日 :

国内外の別 :

○取得状況 (計 0 件)

名称 :

発明者 :

権利者 :

種類 :

番号 :

取得年月日 :

国内外の別 :

〔その他〕

ホームページ等

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 祐記 (ISHIKAWA HIROKI)

岐阜大学・工学部・准教授

研究者番号 : 90273119

(3)連携研究者

()

研究者番号 :