

科学研究費助成事業（学術研究助成基金助成金）研究成果報告書

平成 25 年 6 月 18 日現在

機関番号：12501

研究種目：挑戦的萌芽研究

研究期間：2012～2012

課題番号：24656152

研究課題名（和文） 高性能電力貯蔵磁気軸受フライホイールと電気自動車への応用

研究課題名（英文） High Performance Flywheel Energy Storage System and Its application for Electric Vehicle

研究代表者

野波 健蔵 （Nonami Kenzo）

千葉大学・大学院工学研究科・教授

研究者番号：30143259

研究成果の概要（和文）：

実容量規模のフライホイールエネルギー貯蔵装置のシステム構成要素として、システムの要求性能に適合した、次の各要素を設計・製作した。併せて、各要素を製作するために必要な試作、試験、評価を行い、長時間連続試験による時間的な性能劣化プロセスの解明などによって改善を施し、電動ゴルフカートをプラットフォームとする電気自動車搭載型 2 号機を完成した。さらに、走行テスト等で幾つかの課題も明らかとなった。

- A 電力貯蔵容量を 1 号機の 5 倍近くに増加させた電気自動車搭載型フライホイール 2 号機を完成した。同時にゼロパワー低損失磁気軸受の単純適応制御系設計と実装および性能改善、さらに、可変バイアス適応制御系によるタッチダウン防止技術の提案と実装
- b 発電・電動機とコンバータ、インバータの設計製作と実験による検証および最適化の試み
- c フライホイール系と車両系の全体の数学モデル確立と設計パラメータにおける主要因子の解明およびシミュレーションプログラムの完成とシミュレータ開発。
- d システムの全構成要素をアSEMBルしてコンパクトなモバイル型電力貯蔵磁気軸受フライホイール装置の完成および電動ゴルフカートをプラットフォームとする電気自動車への搭載と走行実験。性能試験と課題の絞り込みについて解析。

以上述べた、2 号機でのハードウェアやソフトウェアの準備と実装をほぼ終了し、走行実験を繰り返し実施した。その結果、1 号機で見られた走行中のタッチダウンは完全に防止できること、とくに、路上からの大きな外乱に対しても全くタッチダウンしないことが明らかとなった。このことから、新しい外乱に強い AMB フライホイールの設計論が見いだせた。

研究成果の概要（英文）：

Flywheel energy storage system (FESS) works by accelerating flywheel to high speed rotation and maintaining the energy in the system as kinetic energy. The energy is converted back by slowing down the flywheel. A typical system consists of a rotor suspended by bearings inside a vacuum chamber to reduce friction, connected to a combined electric motor/generator. Active magnetic bearings (AMBs) are necessary to improve total energy efficiency. In conventional mechanical bearings, viscous damping is directly proportional to speed, and at high speed, too much energy would be lost. From this background, we have been focusing on the use of AMB in FESS due to the significant advantages such as contactless and frictionless bearings at high speed rotation. Usually, magnetic bearings are mostly used only in systems with immovable environment. Here on the contrary, we developed a vehicle with flywheel using magnetic bearing and gimbal mechanism as energy storage system. Flywheel-power assisted cars (mostly mechanical, or with mechanical bearings) have been developed since long time ago and in ongoing researches in effort to make flywheel systems smaller, lighter, cheaper and have greater capacity. Proposed flywheel systems would eliminate the disadvantages of existing battery systems such as low power density, long charge times, heavy weight, short lifetimes, and lead pollution. The weakness is difficulty to store energy for a long time in flywheel. And, high speed rotation implies that the safety concerned with burst failures should be guaranteed. From this consideration, carbon fiber reinforced polymer (CFRP) is chosen as the material for the flywheel, since it is lighter and yet stronger than steel. In vehicle applications, flywheels also act as gyroscopic body, since the angular momentum is typically of

a similar order of magnitude as the forces acting on the moving vehicle. This property may be detrimental to the handling characteristics. Besides, this property could be utilized to improve stability in curves. Conversely, the effect can be almost completely removed by mounting the flywheel within an appropriately applied set of gimbals, where the angular momentum is conserved without affecting the vehicles. We achieved good performance of flywheel supported by zero-bias AMBs by means of controllers which significantly compensate gyroscopic effects. The flywheel can rotate up to 300Hz without any gyroscopic effect. We mounted FESS on an electric vehicle (EV) and designed electric power converter to charge/discharge the energy. We developed and implemented new algorithm to compensate gyroscopic effect while EV is turning. This report describes experimental results including maneuverability and overall energy efficiency, including the results of outdoor field experiments such as feasibility test of steer-by-wire system, implementation of input shaping to reduce vibration and gyroscopic effects, simple adaptive control method for flywheel attitude control, and the efficiency measurement of the energy conversion system.

交付決定額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
交付決定額	3,100,000	930,000	4,030,000

研究分野：工学

科研費の分科・細目：機械工学、機械力学・制御

キーワード：電力貯蔵フライホイール、磁気軸受、電気自動車、適応制御、振動制御、非線形制御
厳密数式モデル、外乱抑制

1. 研究開始当初の背景

電力貯蔵磁気軸受フライホイールシステムは、電気エネルギーと機械エネルギーとの間の相互変換のためにフライホイール回転軸に電動/発電機を連結し、電力の貯蔵/放出に伴ってフライホイールを加速/減速させる。エネルギーの貯蔵に関する特長は軸受の非接触化によるエネルギー貯蔵効率の向上以外に、フライホイール高速化によるエネルギーの高密度化がある。フライホイールに蓄えられるエネルギーは重量を W 、回転数を R とすれば、理論的に $W \times R^2$ に比例するので、貯蔵エネルギーを大きくするには重量よりも回転数を上げる方が効果的である。従って、高速化が可能なフライホイール材料CFRP(カーボン繊維強化プラスチック)が使われる。それによりフライホイールの重量を軽くでき、磁気軸受フライホイールの特徴をより発揮させることができる。フライホイール磁気軸受を電力貯蔵として利用すれば、エネルギー貯蔵密度が高い、高速繰り返し充放電が可能で、有害廃棄物がなく環境にやさしいなどの利点を有し、電力の負荷平準化や負荷変動補償システム、データセンターなどの無停電電源への応用、さらには位置エネルギー貯蔵が可能なフォークリフトやタワークレーン、また、エネルギー回生機能を備えることで高速鉄道、バス、一般車両への応用が期待される。本報告では、著者らが行っている電力貯蔵磁気軸受フライホイール搭載型電気自動車の研究について述べる。

2. 研究の目的



図1 磁気軸受型電力貯蔵フライホイール搭載電気自動車の概要



図2 磁気軸受フライホイール外観

これまでの電力貯蔵磁気軸受フライホイールの研究の多くは無停電電源装置(UPS)に代表されるような据え置き型のものが多い。著者らは小型車両等に搭載可能な電力貯蔵磁気軸受フライホイールの研究を行っており、フライホイールロータ単体のゼロバイアス安定化制御、ジャイロ補償制御、外乱抑圧制御、ジンバル付フライホイールの設計と製作・実装を完了し、電力貯蔵磁気軸受フライホイールシステムを小型電気自動車に搭載済みとなっている。図1は著者らの研究で用いている磁気軸受型電力貯蔵フライホイール搭載の電気自動車を示し、図2は図1の電気自動車に搭載されたフライホイールの外観写真である。

本研究では、以下の研究を行うことを目的としている。

- A ゼロパワー低損失磁気軸受の制御系設計と実装および性能改善、さらに、可変バイアス単純適応制御系によるタッチダウン防止技術の提案と実装
- b 発電・電動機とコンバータ、インバータの設計製作と実験による検証および最適化の試み
- c タッチダウン抑制用制御アルゴリズムの開発・さらに、数学モデルの確立と設計パラメータにおける主要因子の解明

3. 研究の方法

ロータ・フライホイール総重量約 100kg で、300Hz あるいは 400Hz で高速回転することで放電・充電を行う。電力貯蔵磁気軸受フライホイールシステムを、車両後部座席に実装する。とくに、電力貯蔵磁気軸受フライホイールを実装した電気自動車のプラットフォームとしてゴルフカート 2 号機を改造している。

車両は全長 3.5m、幅 1.2m、高さ 1.8m で、総重量は 550kg である。2 名まで乗ることが可能で、図 2 のフライホイールはケーシングも含めた全重量は約 200kg である。電気自動車は 48V で、出力 2.8kW、20 度の斜面まで登攀可能である。加速時はフライホイール側の発電機により運動エネルギーを電力に変換してチョッパ回路・インバータ回路を経て電気自動車側モータへ電力として供給する。逆にブレーキ時には電気自動車側発電機を介して運動エネルギーを電力に変換後チョッパ回路・インバータ回路を経てフライホイール側モータへ供給することでフライホイール回転数を上昇させエネルギー回生を行う。このように電気自動車側のモータ・発電機とフライホイール側のモータ・発電機は共に時定数が小さく、短時間の充放電が容易である。一方、従来型の電気自動車と化学バッテリーの鉛蓄電器との関係は瞬時の充電には適さず、充電には少なくとも 10 分程度の時

間を要する。このことで、頻繁に加速・減速・ブレーキというような市街地走行用電気自動車には電力貯蔵磁気軸受フライホイールが極めて優れていると思われる。

しかし、電力貯蔵磁気軸受フライホイールをモバイル型車両に搭載するに当たっては、以下の点に留意する必要がある。完全非接触磁気浮上した高速回転中のフライホイールが真空容器内にあるために、急加速・急減速・急停止などに対する保護軸受への接触防止技術を実装する。磁気浮上した高速回転中のフライホイールは大きな回転エネルギー、すなわちジャイロモーメントを有しているため、急旋回時にこのジャイロモーメントを抑制する技術を実装する。路面から受ける様々な外乱に対して、フライホイールシステムを保護するために最適な免振・除振技術を組み込む。高速回転中のフライホイール磁気浮上系はいかなる状況にあっても絶対安定性を保持する。最適で高効率な充放電システムを設計・実装すると同時に、操舵系・充放電系・磁気浮上系・軌道生成系・駆動系すべてのシステムを最適化して最高の効率でエネルギー最小となる運転システムを構築する。

本研究のと に対してはすでに 1 号機の車両での研究で実績がある。すなわち、フライホイールを 2 軸ジンバル機構で支持して、かつ、能動的なフィードフォワード制御法である線形入力整形法と非線形入力整形法を適用することで、急加速・急減速・急停止・急旋回などに対する振動抑制を実現している。特に旋回に関して、ジャイロ効果を抑制するためにステア・バイ・ワイアというコンピュータ制御のステアリング駆動法と、アクセル操作システムを独自に考案して採用している。従来型のメカニカルな結合がステアハンドルとタイヤ系にはもはや無く、制御信号を介してサーボ系としてタイヤの操舵がなされる。すなわち、ステアリングハンドルから任意の信号がドライバーから入力されると、ジャイロ効果を最も抑制するステアリング軌道を計算で求めて、コンピュータがその軌道を正確に実現するというもので、目標角は人が入力するが、実際の旋回軌道は微妙な動きをしながら目標の旋回を達成するというものである。

については本研究が最も重視した研究内容で、大きな外乱が加わってもタッチダウンを防止できる技術である。具体的には可変バイアス電流型として外乱抑制とタッチダウン防止を図っている。はゼロバイアス非線形制御、とくに、PID 型単純適応制御アルゴリズムを実装している。フライホイール系は強いジャイロ効果の影響を受けるシステムであるが、回転数に応じて最適ゲインを探索し、これによって、ジャイロ効果の影響を完全に抑制しており、応答には全くその影響が見られない。制御は単純適応制御を採用している。

については目下、検討中であり最適な効率を実現したいと考えている。

ゼロバイアスPID型単純適応制御の結果について紹介する。ゼロバイアス制御はバイアス電流を用いずに制御電流のみで制御する方法で、コイルに流す電流を極小にすることで、まずは省電力型磁気軸受系を実現している。さらに、コイル電流が小さいため渦電流等の発生を抑制し低損失型磁気軸受を実現している。その上、増幅器の飽和なども抑制できる利点があり優れた性能を有している。電磁力としての吸引力でみれば線形システムであるが、コイル電流を求める際に非線形となるため、非線形制御と呼んでいる。非線形制御であるため平衡点から軸心が大きく離れた場合やタッチダウンした場合でも容易に平衡点に復帰できるという特徴を有する。一方、欠点としてはコイル電流が小さいため、総じて軸受剛性がバイアス形より小さくなる傾向にある。このため、比較的負荷が小さいターボ分子ポンプや電力貯蔵フライホイールなど高速回転のみを行っているシステムには好都合である。

4. 研究成果

研究成果の第1は、電気自動車が走行している大きな外乱環境下でも全くタッチダウンしない電気自動車・磁気軸受電力貯蔵フライホイールシステムが完成したことである。図3にも示すように大きな外乱にもかかわらず、大変安定な制御が実行されている。この場合、電気自動車は図4に示す学内の路上を走行した。この場合、途中で車両減速用の突起があり、大きな外乱を受けていたにもかかわらず安定に制御されていることが分かる。成果の第2は、電気自動車・磁気軸受電力貯蔵フライホイールの完全な数学モデルが構築できたことである。これにより実際の挙動に極めて近いシミュレーションが実行できるために、研究進捗の効率アップにつながるかと確信している。

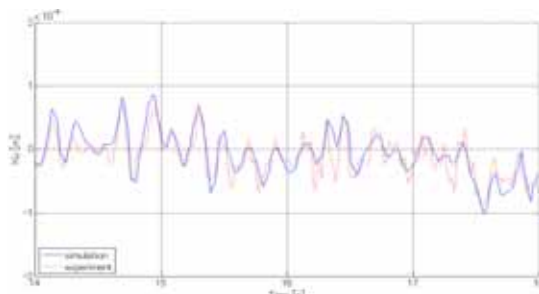


図3 電気自動車走行中のフライホイールの振動状態(青:シミュレーション、赤:実験)

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)

本年9月に成果を学术论文として発表予定



図4 電気自動車の学内走行ルート

〔その他〕
ホームページ等

URL: <http://mec2.tm.chiba-u.jp/~nonami/>

URL: <http://mini-surveyor.com/>

6. 研究組織

(1) 研究代表者

野波 健蔵 (Nonami Kenzo)

千葉大学・大学院工学研究科・教授

研究者番号: 30143259