

平成 22 年 5 月 20 日現在

研究種目：基盤研究 A

研究期間：2007～2009

課題番号：19206025

研究課題名（和文） 車両搭載用モバイル型電力貯蔵磁気軸受フライホイールの研究開発

研究課題名（英文） A Study on Flywheel Energy Storage System Mounted on 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）：

二次電池化学エネルギー貯蔵装置を機能的に代替できる、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的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プロトタイプ1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 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 ジンバル(本システムのジャイロ効果を相殺し車両等モバイル型フライホイールに耐える運動性能を確保するもの)の設計・製作・組み立てとタッチダウン抑制用制御アルゴリズムの開発。さらに、数学モデルと確立と設計パラメータにおける主要因子の解明。
- d システムの全構成要素をアセンブ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、すべて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、電気自動車の運動性能の向上を 50%改善するという飛躍的な性能改善効果を確認するとともに、回生エネルギーを確認した。また、ジンバルによるジャイロモーメントの低減において約 40%の低減効果を確認した。とりわけ、平成 21 年度はインバーター等をすべて自作して性能改善を試み、新しい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 researchs 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
2007年度	21,300,000	6,390,000	27,690,000
2008年度	7,900,000	2,370,000	10,270,000
2009年度	7,900,000	2,370,000	10,270,000
年度		0	0
年度			
総計	37,100,000	11,130,000	48,230,000

研究分野：

科研費の分科・細目：

キーワード：(1) 電力貯蔵フライホイール (2) 磁気軸受 (3) 電気自動車
 (4) ジャイロ効果補償 (5) 振動制御 (6) 非線形制御
 (7) 厳密数式モデル (8) エネルギー変換効率

1. 研究開始当初の背景

近年、エネルギー消費が年々伸びている。特に、電気エネルギーの利便性(クリーンで利用しやすく、かつ安全である)から電力需要の増加はエネルギー消費の伸びを大きく上回っており、電力シフトの傾向はとても強いといえる。今後、現在値の3～5倍の電力需要の増加を考慮する必要があると言われている。電力需要の増大に伴い昼夜間の電力格差が増大しつつあり、夏期1日における夜間電力需要は、昼間の電力最大需要に対し約40%に過ぎない。電力システム運用の効率が低いことは

深刻な問題となる。また、ITの進展に伴い、通信網の不慮の停止はあらゆる社会生活や個人生活に極めて重大な影響を及ぼすようになってきた。現在、鉛蓄電池によるバックアップ電源が多数使用され、今後も急速に拡大する方向である。しかし、鉛蓄電池は数年(3～4年)の寿命でメンテナンスが必要であり、さらに内部に人体、植物に強い影響を及ぼす化学物質および重金属が使用されており、環境問題を避けて通れないのが現実である。

一方、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、著者らがや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

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と図2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断面と外

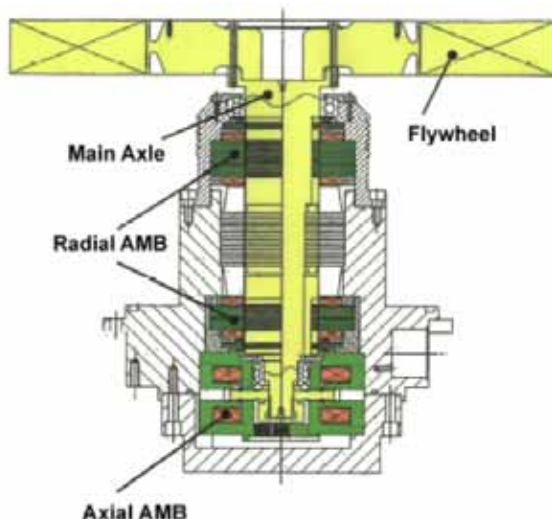


図1 磁気軸受型電力貯蔵フライホイール



図2 磁気軸受フライホイール外観

観写真である。これを電気自動車に搭載して、以下の研究を行うことを目的としている。

- 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、可変バイアス適応制御系によるタッチダウン防止技術の提案と実装
- 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
- ジンバル(本システムのジャイロ効果を相殺し車両等モバイル型フライホイールに耐える運動性能を確保するもの)の設計・製作・組み立てとタッチダウン抑制用制御アルゴリズムの開発。さらに、数学モデルと確立と設計パラメータにおける主要因子の解明。
- システム的全構成要素をアセンブ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。

である。

3. 研究の方法

ロータ・フライホイール総重量約 13kg 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、2 軸のジンバル機構で支持した状態で車両後部座席下の実装する。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。5 名まで乗ることが可能で、図 2 のケーシングも含めた全重量は約 100kg、ジンバル機構込みで 150kg 程度である。電気自動車は 48V で、出力 2.8kW、20 度の斜面まで登攀可能、1 回のフル充電で約 50km 走行ができる。加速時は 2 軸ジンバ

ル機構で支持された電力貯蔵フライホイールから放電して加速性を上げる。このとき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。

本研究は と に対してはフライホイールを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・ワイヤ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。についてはパッシブな振動制御法を適用して最大限の振動抑制を実現している。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Fig. 8のように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ないで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。

100Hz, 200Hz, 300Hzの3種類についてゼロバイアス単純適応制御によるフライホイールロータの重心の軌跡を詳細に考察した。ジンバル系の固有振動数が0.2Hz付近にある。回転数が100Hz 付近には剛性2次前向き触れ回り固有振動数と、曲げ1次後ろ向き触れ回り固有振動数、そして剛性1次後ろ向き触れ回り固有振動数があるが、完全同期触れ回り振動のみが観測され、ジャイロ効果による非同期振動の影響が全く現れていないことが確認された。そして、特徴的なゼロバイアス制御法の結果が、向かい合う電磁石の電流が交互に半波正弦波となっていることが分かった。向かい合うコイルの片方に電流が流れているときには、もう一方のコイルには電流が流れないことが良く分かった。すなわち、制御電流のみがコイルに流れている。また、回転数が高くなるにつれて制御電流は少しずつ小さくなる傾向にある。これは自己平衡作用の現われで、高速回転すればするほど、慣性中心

の周りを回る性質が強くなり、より安定性が増大することによって制御電流が不要となることになる。究極は理論的にはゼロパワーとなりうるため、ゼロバイアス非線形制御をゼロパワー制御と著者は呼んでいる。

完全同期振動の応答のみが現れており、極めて安定な応答となっている。触れ回り振幅も100Hz, 200Hz, 300Hzいずれも $2\mu\text{m}$ となっており、振動特性も良好である。

電気自動車が一速度で走行する時と加速時の場合の軸心応答については、フィードフォワード制御の線形入力整形法を適用しているために振動が小さく抑制されている。

車両が旋回するときに発生する遠心力によってジャイロ効果が誘発され、機械式軸受形フライホイール搭載車に対してジャイロ効果は運転性能に悪い影響を与えていることが報告されている。本研究では磁気軸受フライホイールであるため、まずはジャイロ効果の影響がどの程度であるかを調べた。そこで、フライホイールの回転時(100Hz)と非回転時についてジンバルの姿勢角を計測して比較した。なお、旋回運動についてはステアリングのハンドル角度を固定して一速度で円運動を行った。

ジンバル系の座標系は車両進行方向をX軸、これと直角方向をY軸とした。車両が右旋回するときは遠心力が働く。X軸方向成分の遠心力はY軸方向成分と比べて十分に小さく無視できる。右旋回時はジンバル機構はY軸の負の方向に遠心力を受ける。ケーシングの重心はジンバル機構の回転中心より下側にあるため、ジンバル機構はX軸周りに正のモーメントを発生する。このモーメントによりジャイロ効果が生じ、ジンバルのピッチ角が負側に傾く。一方、非回転時は、傾き角度が小さいことが分かる。以上の実験結果から大きなジャイロ効果が観測された。これに対して、ステア・バイ・ワイヤ駆動法による非線形入力整形法の適用によりピッチ角変動を30%程度に抑制できた。また、新たな実験から得られた現象としてフライホイール回転数を高速化すると、ジンバル系固有振動数が次第に低下することも明らかとなった。この点はフライホイール・ジンバル・台車系の包括的な運動方程式からも検討している。

さらに、チョップ回路とインバータ回路のモデリングと制御にも取り組んでいる。結局大きく分けると3つの制御系がキーとなっている。1つ目はフライホイールの安定化制御、2つ目は半自律運転制御で磁気浮上系のタッチダウンを防止するためのステアリング系とアクセル操作系がある。3つ目は充放電制御で、車両の加減速に適した充放電制御である。

なお、安定化制御に関しては、どのような悪路走行や乱暴な運転にもフライホイールをタッチダウンさせないために、また、ジャイ

ロモーメントによる操舵性・操縦性の低下を完全に防止するために、回転が逆方向の対のフライホイールを設置することでこの問題は解決できると考えている。このエネルギーは当然ながら回生エネルギーで供給されるものであり、パッシブ系と併用して最小なエネルギーとなるよう検討中である。

充放電については、放電時に電力貯蔵フライホイールが無い場合と比べると、Fig. 15(a)のように約50%程度の電気自動車の加速性能を向上させることが出来る。また、充電時は大容量電力を瞬時に電力貯蔵フライホイールに回生出来ることが実験から明らかである。これらの結果は電気自動車の性能を飛躍的に向上できる。

いずれにしても、安定化制御、ステアバイワイヤ駆動制御、充放電制御の3つのシステムを最適に制御するシステムが構築されて、はじめて高性能で高効率な電力貯蔵磁気軸受フライホイール搭載電気自動車が誕生する。著者はこうした3つのシステムを統括制御するスーパーバイザー制御系の構築に向けて、研究を行っている。

本研究はパワーエレクトロニクス系とメカ車両系およびロータダイナミクス・ジンバル系が複雑に連成干渉しており、各要素技術を完全に制御すること、さらには、スーパーバイザー制御器が全体を最適化することで、初めて高効率で究極のエコカーである電力貯蔵磁気軸受フライホイール搭載型電気自動車が実現できると思われる。また、実験から初めて明らかとなった現象などが発生し、大変興味深い領域であると感じている。地球温暖化防止の観点から一層ここで紹介したような3R技術(Recycle, Reuse, Reduction)は今後益々重要になるとと思われる。

4. 研究成果

すべてハードウエアやソフトウエ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、電気自動車の運動性能の向上を50%改善するという飛躍的な性能改善効果を確認するとともに、回生エネルギーを確認した。また、ジンバルによるジャイロモーメントの低減において約40%の低減効果を確認した。とりわけ、平成21年度はインバータ等をすべて自作して性能改善を試み、新しい設計論が見いだせた。

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6件)

K.Kuriyama, K.Nonami and B.Rachmanto, Modeling and Consideration of AMB-Flywheel Supported by Two-axis Gimbal, Journal of System Design and Dynamics, Vol.3, No.4, pp.681-693, 2009

B.Rachmanto,K.Nonami and K.Kuriyama,
A Study on AMB Flywheel Powered
Electric Vehicle, Journal of System Design
and Dynamics, Vol.3,No.4, pp.659-670,
2009

S.Sakai,K.Kuriyama and K.Nonami, A
Novel Passivity Based Control of Active
Magnetic Bearing Systems without Con-
ventional Cross-Feedback, Vol.3,No.4, pp.5
40-550, 2009

〔学会発表〕(計 10 件)

佛慈浪漫人,野波健蔵,島崎浩,鏡石岳弘,電
力貯蔵磁気軸受フライホイール搭載電気自
動車の研究,日本機械学会 機械力学・計測
制御部門

Dynamics and Design Conference 2009,
2009年8月8日

〔図書〕(計 0 件)

〔産業財産権〕

出願状況(計 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

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

(2) 研究分担者 なし