

研究題目	非摩擦伝導型リンク式無段変速機とフライホイールを用いた発電蓄電システム		
研究者	氏名	湯川 俊浩	
	所属機関	岩手大学 理工学部	
	職位	准教授	

1. 緒言

風力や波力などの自然エネルギーによる発電方法は、火力発電や原子力発電と比較して、化石燃料や放射性燃料を必要とせず、発電後に廃棄物が発生しないクリーンで永久的な発電方法である。しかし、自然エネルギー発電によって得られるエネルギーは天候や周囲環境に大きく左右される。強風の際には大きいエネルギーを得られるが、風がないときは発電量が低い。自然エネルギーの大きさは時々刻々変化しており、得られる電力量にはむらが生じ、平均的に発電効率が低い。また、発電所の建設費が高く、採算性が低い。

風力発電の現行システムは、三枚のブレードがハブに固定され、ハブと一体となってロータ軸が回転し、増速機を介してナセル内の発電機を回転させて発電するしくみである。このシステムには、ブレードの回転軸の方向を変えるためのハブ（ヨー軸制御システム）、風速・風向計および避雷針なども装備されている。

本研究は、自然エネルギーにより得られる電力量が小さいときでも、一定の電力の出力供給を可能とするため、独自開発の変速機とフライホイールおよび発電機を組み合わせた発電・蓄電システムを提案する。この変速機は高負荷対応型の無段変速機である。これは非摩擦伝動型のリンク式無段変速機（以下、L-CVTとよぶ）であり、大動力を伝達可能である。この変速機を介してロータ軸の回転力を発電機やフライホイールに伝えるようにする。

本発電・蓄電システムの稼働のイメージを図1に示す。このシステムには二つの稼働パターンがある。(A) 自然エネルギーが小さい状況では、フライホイールの回転速度を増加させることができない代わりに、フライホイールの回転力を利用して発電機を回す場合、(B) 自然エネルギーが大きい好条件下では、フライホイールへロータ軸からの回転力を伝えて回転速度を増加させつつ、余剰エネルギーで発電機を回す場合、の二種類の稼働パターンである。L-CVTはロータ軸の回転数からフライホイールの回転数の状況に合わせて変速比を制御してトルクを伝える役目と、発電機へ伝わる出力軸の定格回転数を調整するために変速比を制御するという二つの役目をもつ。

本システムは、電力供給を一定にする用途以外にも、揚水発電で図られているように、電力需要の負荷平準化^[1]として利用できる。電力需要のピーク時に多くの電力供給を要求された際や、気候変動の影響で発電量が不十分である場合に備えて、発電システムにフライホイールを搭載することで、余剰電力を蓄えることができ、電力需要が増大したときに対応可能となる。

フライホイールは、短時間で充電、放電が可能であるという点から、さまざまな研究がすすめられている^{[2]-[4]}。フライホイール自体は、慣性力によって回転力を一定に保持するため、自動車や電車などの乗り物に搭載されており、燃焼サイクルの補助や再生エネルギーの蓄電などの用途にも利用されている。フライホイールは、設計によっては蓄積エネルギーの損失が大きくなる場合がある。本研究では、エネルギー損失を低減するため、フライホイールの支持機構を単純化することで、軸受の摩擦や振動による影響を最小限とし、軸受の摩耗などの状態を確認するため、転がり球による点接触を用いた単純支持機構とする。他の研究機関では、エネルギー密度や比強度の観点から、円盤部に炭素繊維強化プラスチック(CFRP)を採用したもの^[1]、^[2]や、エネルギー損失削減のために、軸受部に磁気軸受を採用したもの^[3]、^[4]が研究開発されている。

2. 非摩擦伝動型リンク式無段変速機

非摩擦伝動型リンク式無段変速機(L-CVT)は、主に四節リンク機構(スライダークランク)からなる。このリンク機構の最短長のクランクを入力とし、揺動するこを出力とする。この機構の利点として、大動力の伝達が可能となり、さらには変速比をゼロ付近から無限大まで広範囲にわたり変化できることを特長とする。従来方式のCVTの変速用油圧機構は動力損失の大きな要因となるが、L-CVTはリンクの回転力を伝動させるしくみであり、油圧機構が不要のため、動力伝達損失の少ない変速が可能である。

今まで申請者らが開発してきたいくつかの種類のL-CVTの一つとして、変速制御用の電動モータを用いずに、機械部品の

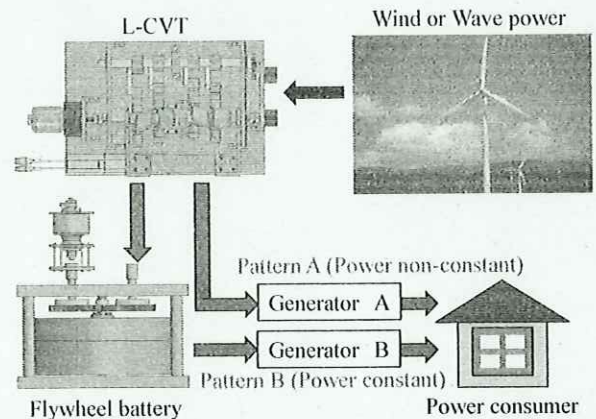


Fig. 1 Concept of the power generation system with L-CVT and the flywheel battery

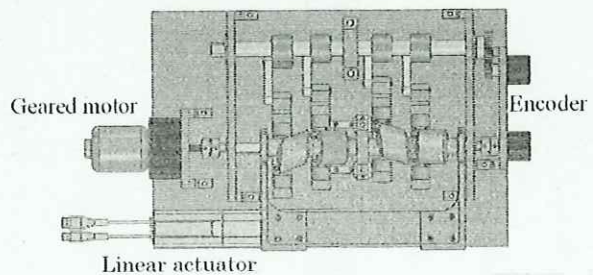


Fig. 2 L-CVT which is composed of four slider crank mechanisms with solid cams and one-way clutches

みで構成された L-CVT^[5]を図2に示す。このL-CVTはスライダークランクユニットが四つ並列に搭載されており、自然エネルギーを代用する入力試験用モータと入出力軸の回転数を測定するロータリーエンコーダを装備している。このL-CVTの四組の伝動ユニットのうち、ユニット単体を図3 (a)側面図、(b)上面図)に示す。各ユニットは、スライダークランク、立体カムおよびワンウェイクラッチからなる。

3. フライホイールバッテリーの開発

3.1 従来のフライホイールバッテリー

従来の一般的なフライホイールバッテリーは、フライホイール、回転軸、軸受、発電機およびケース(筐体)で構成される。軸受で支持されたフライホイールは、外部からの運動エネルギーによって回転速度が増加し、同時に慣性力も増す。逆に、外部の負荷によって運動エネルギーが消費され、また、空気抵抗や摩擦によるエネルギーの消耗もある。これらのエネルギー損失を小さくするために、他機関の研究開発として、真空ポンプを搭載し、筐体内に真空状態を作り出して対応する例や、フライホイールの軸受の機構として、超低温化における電磁石の性質を用いた電磁軸受やピボットおよびニードルベアリングで対応する例がある。

3.2 開発したフライホイールの構造

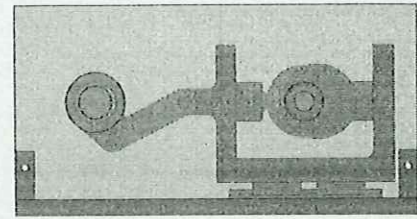
エネルギー保存効率の高いフライホイールを開発する上で、軸受部の接触方法について検討した。開発したフライホイールは、大きさが直径 ϕ 250 mm、高さ100 mmであり、フライホイール円板は、高さ40 mmと60 mmの二つの円板を位置決めピンにより合わせたものであり、質量が38.3 kg、材質はS45Cである。上下の筐体は、300 mm四方で厚さ20 mmのS50C板からなり、中心には、大端径 ϕ 23 mm、小端径 ϕ 20 mmの支持球打ち込み用のテーパ穴を設けた。真円球はベース(筐体)の中央にあるテーパ穴に圧入される。点接触によるフライホイール支持に用いる真円球の大きさは ϕ 22 mm、材質は炭素クロム軸受鋼(SUJ2)、HRC 62~67である。フライホイールを支持するために、支持機構を曲率半径の異なる真円球と凹球面加工を組み合わせた。軸受用の球と接触する軸受の凹球面加工部と、フライホイールの上側軸を支持する回転軸には、ロックウェル硬さ(HRC)が58以上の材料を用い、合金工具鋼(SKD11)に焼き入れを施した。フライホイール上部の回転軸の凹球面とフライホイール下部の回転軸の凹球面における接触は点接触である。ベース(筐体)の上下に圧入した真円球によって、上下で合計二点の点接触による支持でフライホイールは挟まれて支持される。フライホイール下部の凹球面の加工箇所は、フライホイールの自重を支持し、機械構造用炭素鋼(S45C)に部分焼き入れをおこなったことで、HRCが50以上とみなされる。フライホイールの下部軸は、真円球と当たる軸受部分が摩耗を起し、削れや変形が発生することが想定されるため、焼き入れを施したS45Cを選定した。以上、市販のベアリング製品の代わりに、少ない部品点数の接触要素による支持機構にした。

4. 蓄電システム

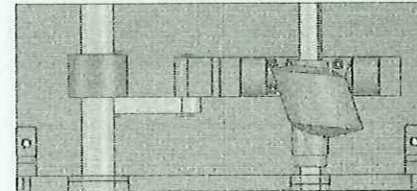
4.1 蓄電システムの構造設計

回転運動エネルギーの蓄積と消費を確認するための蓄電システムの実験装置は、L-CVTと接続するギアボックスなどが必要であるため、3D CADソフトを用いて設計した。つぎに、自然エネルギーやタービンなどの時々刻々と変わる不安定な回転量を安定化するための制御システム設計をおこなった。フライホイールとL-CVTを接続するために、フライホイールの入出力部に追加工を施し、ハブダイナモ発電機を搭載した蓄電システムを図4に示す。フライホイールの入出力軸にはワンウェイクラッチが取り付けられるので、フライホイールには入出力側の双方からの負荷に影響されずに、L-CVTの一サイクル毎に逐次的にエネルギーが蓄えられる。ダイナモの発電電力値は、I-Vコンバータを介して、ダイナモに流れる電流値の時系列データを測定し、積算することで得られる。他方、設定した変速比、つまりトルクの入出力関係から、L-CVTの入出力特性が把握でき、トルク伝達効率が計算できる。

発電・蓄電システム全体を図5に示す。前述したように、L-CVTとフライホイールの他に、ダイナモ、外部から回転力を加えるためのDCモータ、L-CVTの入出力軸の角度応答を測るロータリーエンコーダを設置する。DCモータによる入力、L-CVTを介してフライホイールに伝達し、機械的に蓄電される。L-CVTとフライホイールの間に設けられたギアボックスは、フライホイールの回転速度にある程度合わせるため、変速比は1:10に設定された。L-CVTの出力軸にはワンウェイクラッチが組み込まれ



(a) Side view



(b) Top view

Fig. 3 Fundamental structure of a unit in the L-CVT

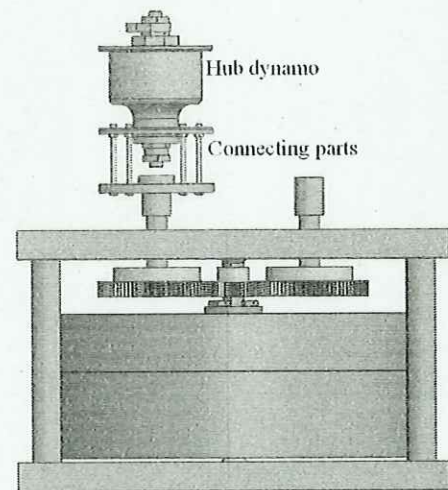


Fig. 4 The structure of the flywheel battery system

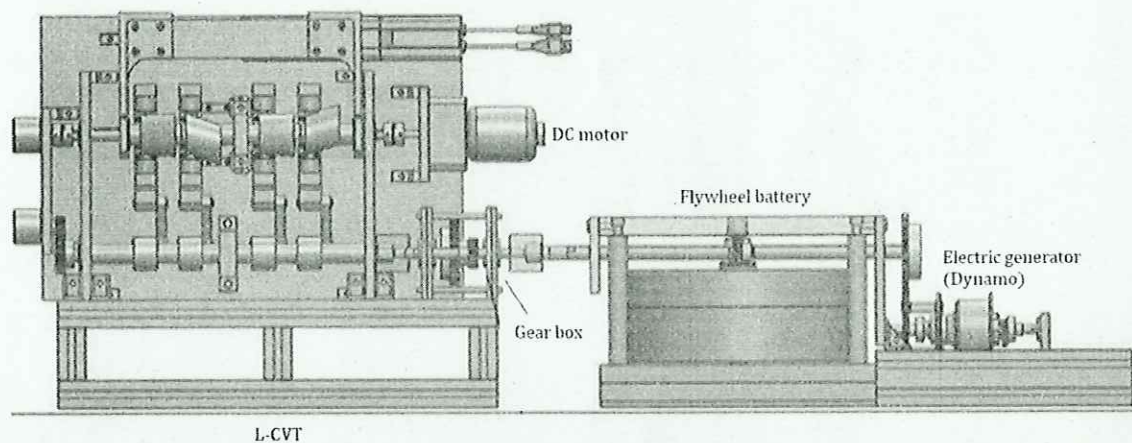


Fig. 5 The energy storage system

ており、フライホイールに動力を伝達するとき以外は、出力軸がワンウェイクラッチに対して空転するため、L-CVTがフライホイールの回転を阻害しない仕組みになっている。

4.2 蓄電システムのシーケンス

マイコンを用いた蓄電システムのシーケンスアルゴリズムとして、大きく次の三つのはたきがある。まず、DCモータに対する正規分布ランダム信号の回転指令を与える。自然エネルギーによる発電は、前述のように天候や周囲の環境に依存しており、モータドライバーを介して信号を送信することで、これを仮想的に再現する。次に、L-CVTに対する変速比の変更指令を立体カムの回転軸に沿った直動機構のスライド変位としてリニアアクチュエータに指令を与える。立体カム機構とリニアアクチュエータの動作部は機械的に並列に連結されているので、変速比を直接変化させることができる。三つ目は、フライホイールの回転量を受信することである。フライホイールの入出力軸にロータリーエンコーダを取り付けることで、回転量をリアルタイムに計測でき、これによって蓄電量が推定できる。以上の蓄電システムのシーケンスを構築することで、DCモータの入力回転およびフライホイールの回転のデータをもとに、フライホイールの蓄電に最適な変速比をL-CVTに指令し、フライホイールの回転数を増加させて回転運動エネルギーを蓄積することができる。

4.3 フライホイールの蓄電量および減衰

フライホイールのエネルギー容量および無負荷時におけるエネルギー減衰について測定をおこなった。つぎに、フライホイールの運動エネルギーの時間推移を測定した。

フライホイールの入力軸に直接接続したDCモータに定格電源を投入し、フライホイールを回転させ、回転の伝達を切り離れた時点をもとに $t=0$ s とした。フライホイール本体の回転が停止したのは $t=30.2$ s 後であった。回転運動エネルギー W は、フライホイールの慣性モーメントを I [kg m²]、フライホイールの角速度を ω [rad/s] とすると $W=I\omega^2/2$ [J] で表される。動力伝達を切った時点のフライホイール本体の角速度は 11.0 rad/s であった。蓄電量 W を算出したところ、 $W=18.1$ J となった。なお、フライホイールの平均角加速度は -0.364 rad/s² であった。本実験の考察として、フライホイールの速度減衰は支持機構部分の摩擦や空気抵抗が主な要因であると推測される。

5. 結言

L-CVT とフライホイールバッテリーを組み合わせた発電・蓄電システムを提案し、フライホイールの蓄電量および減衰について評価した。この評価に基づいて、本システムの動作シーケンスのアルゴリズムを構築した。従来のフライホイール機構に用いられる回転支持部に対し、回転軸の上部と下部に取り付けた真円球による二点の点接触で支持する新たな機構を開発し、この機構を搭載したフライホイール蓄電装置を構築した。つぎに、フライホイールバッテリーの発電・蓄電性能を調査し、フライホイールとL-CVTを結合した本システムの有効性について、シミュレーションおよび基礎試験により検証した。

参考文献

- [1] 電力需要の負荷平準化, 電気事業連合会, <http://www.fepec.or.jp/enterprise/jigyuu/juyou/>
- [2] 山田, 藤森他, “小型フライホイールエネルギー貯蔵システムの機械損失予測”, 日本機械学会論文集(B編)78巻289号, 2012.
- [3] 山田, 松尾他, “短周期電力平準化用3MJフライホイールエネルギー貯蔵システムの試作試験”, 日本機械学会論文集(C編)79巻806号, 2013.
- [4] 長谷川, 松江他, “実証試験用超伝導フライホイール蓄電装置の開発”, 鉄道総研報告(2015)
- [5] 村上, 湯川, “リンクと立体カムを用いた無段変速機の検討”, 日本設計工学会2014年度秋季研究発表講演会, 2014.

学会発表・論文・著書

- 1) Entitled: Efficiency and Versatility: A Novel Continuously Variable Transmission System with Parallel Lever-Crank Mechanisms, B P

International, Contemporary Perspective on Science, Technology and Research Vol. 7, Chapter 7 pp. 96-113.

Print ISBN: 978-81-971391-8-5, eBook ISBN: 978-81-971391-4-7, DOI: 10.9734/bpi/cpstr/v7/11875F

<https://www.bookpi.org/bookstore/product/contemporary-perspective-on-science-technology-and-research-vol-7/>

2024.3, Toshihiro YUKAWA*, Taisuke TAKAHASHI, Teruhisa KOGUCHI, Yoshiaki OHSHIDA, Youichi TAKED

2) A Method to Evaluate Transmission Efficiency of Gear Reducer

Int J. of Mechatronics and Applied Mechanics-IJOMAM15), Issue 16, pag. 24-32, dx.doi.org/10.17683/ijomam/issue16.3, E-ISSN:

2559-6497, 2024. 6, Toshihiro Yukawa*

3) リンクとカムを有する無段変速機の入出力特性の検証, 計測自動制御学会東北支部 第348回研究集会, No. 348-5, 頁数: 6頁, 2024. 5, 須田浩太, 小口輝久, 我妻奎太朗, 湯川俊浩*

4) 四節リンク・回転対偶機構をもつ無段変速機の構造解析, 計測自動制御学会東北支部 第348回研究集会, No. 348-4, 頁数: 6頁, 2024.5, 田丸公太郎, 小口輝久, 湯川俊浩*

謝辞

貴研究助成を受けたことで, 本課題をすすめることができ, 外部公表できましたことに厚く御礼申し上げます.