

遊星歯車とフライホイール電動発電機 による大電力充放電装置の損失低減

宮本慧悟*, 加藤修平**

A Study on Loss Reduction of Flywheel Motor Generator Using Planetary Gear

Keigo MIYAMOTO* and Shuhei KATO**

Electricity storage technology is essential for the widespread use of renewable energy and the realization of nuclear fusion power generation. Currently, the mainstream electricity storage technology is battery-type, but it has various weaknesses. Therefore, we propose an electric power charging and discharging system that combines a flywheel and a motor generator. A flywheel is a disk-shaped rotating body that can convert electrical energy into kinetic energy and store it. Two types of flywheel devices (a direct-coupled shaft device and a device equipped with a planetary gear mechanism) were manufactured and mechanical losses were compared through free deceleration tests. The results showed that the device equipped with a planetary gear mechanism can reduce total mechanical losses by about 10% compared to the direct-coupled shaft device. In addition, a breakdown of the mechanical losses showed that windage losses accounted for about 70%. Furthermore, the effect of reducing windage losses by using Helium gas was examined.

Keywords: Flywheel, Energy storage, Nuclear fusion, Renewable energy

1. はじめに

日本は 2050 年のカーボンニュートラルに向けて再生可能エネルギーに力を入れている。しかし、配電系統での電圧上昇が原因でこれらの発電を停止させる、又は発電出力の抑制を強いられている。九州や四国などで出力抑制が多かったが、2024 年の 4 月以降、首都圏でも出力制御が検討されている¹⁾。このように、日本は再生可能エネルギー電力の増加に追いつくことができず、最大限の能力を発揮できていない。また、将来開発が期待されている核融合発電

ではプラズマ電流の立ち上げ時に磁気エネルギーの変動が伴うため、数百 MW 級の交流電力変動があり、その平滑化が課題となっている²⁾。これらの問題の解決策が蓄電技術である。

現在主流の蓄電技術はバッテリー式である。しかし、バッテリーは 5 年程度の短寿命、性能の環境温度依存、リサイクル不可という弱点がある。また、大規模太陽光発電所など、電力系統が特別高圧の場合、バッテリーと電力系統の電圧が異なるため、バッテリー、電力系統間に巨大な変圧器、周波数変換器（インバータ等）を設ける必要がある。これらもバッテリー式の弱点といえる。そこで、フライホイールと

* 日本大学大学院生産工学研究科電気電子工学専攻 博士前期課程電気電子工学専攻 2 年

** 日本大学生産工学部電気電子工学科 准教授

電動発電機を組み合わせた電力充放電システムを提案する。フライホイールとは電気エネルギーを運動エネルギーとして貯蔵、その逆の発電もできる円盤型の回転体である。フライホイール装置による電力応用は電鉄、鉄鋼、核融合など短時間に大電力を扱う分野で古くから利用されている^{3)~6)}。フライホイールはバッテリーと比較すると半永久的な寿命、外気温による耐環境性が高い、リサイクル可能など様々な優位性がある。筆者らはこれまでにフライホイールを使用し10kW級の停電対策装置や再生可能エネルギーの平滑化システムを実証してきた^{7, 8)}。本稿では常時回転しているフライホイールのアイドリング損失のうち機械損失の低減について実験検証を行ったので報告する。

2. 提案装置

2.1 直結型フライホイール充放電システム

提案するシステム構成では再生可能エネルギーの余剰電力を電動発電機に貯蔵し、電動発電機でフライホイールを加速させ、再生可能エネルギーの発電出力が低下した際にフライホイールの機械的な回転運動エネルギーを取り出して平滑化する。システム構成の一つとして、Fig. 1の方式ではフライホイールと電動発電機によって構成されており、それぞれの軸が直結されている。充放電に伴いフライホイール回転速度の変動により電動発電機の回転速度も変動する。よって、発電周波数や電圧を一定に保つべく、バッテリー式と同様に装置と電力系統間にパワー半導体による巨大な電力変換器を設ける必要がある。

2.2 遊星歯車機構搭載フライホイール充放電システム

2.2.1 システムの概要

もう一つの方式として筆者らが提案している遊星歯車機構を搭載した方式をFig. 2に示す⁹⁾。この方式ではフライホイール、電動発電機、制御モータ、遊星歯車機構によって構成されている。遊星歯車機構とは中央の歯車、サン（太陽）の周りをキャリアが惑星のように自転しながら公転する機構である。遊星歯車機構の外観をFig. 3に示す。実際の太陽と同じようにサンも自転する。遊星歯車機構はサン、キャリア、リングの3軸のうちリングを固定してキャリアに対してサンを増速機（またはサンに対してキャリアを減速機）として使用することが多い。自動車ではほぼすべてのオートマチック車、ト

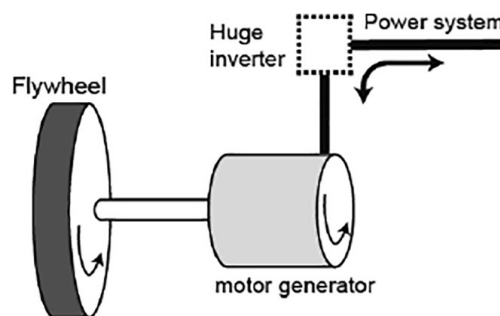


Fig. 1 Charging and discharging system with flywheel motor generator.

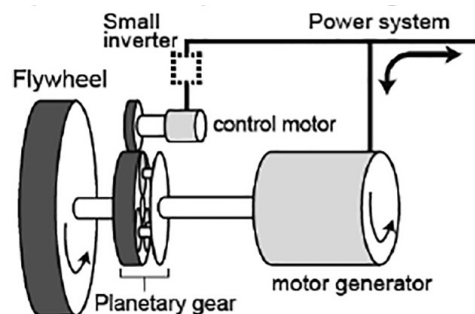


Fig. 2 Charging and discharging system with flywheel and planetary gear.

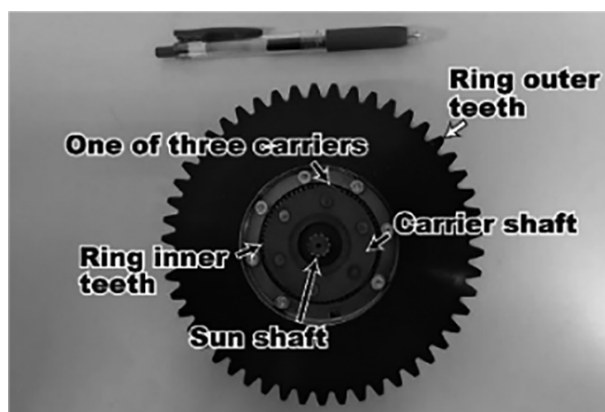


Fig. 3 External appearance of the planetary gear mechanism used in the experiment.

ヨタのハイブリッド車に使用されている。オートマチック車では複数の遊星歯車機構のリングを順々にロックさせながら多段変速している¹⁰⁾。本構成ではリングも回転させる。リング回転数は制御モータを使用して制御する。Fig. 3に示すように遊星歯車機構のリングにはキャリアの内周歯とは別に外周にも平歯車が設けられている。この外周の歯と制御モータの歯が噛み合うことにより、リング回転速度は制御モータによる制御が可能である。リング回転速度を制御することで電動発電機の回転速度を一定に維持することができる。遊星歯車機構は増速ギア比を無段階で可変できるため、サンに接続しているフライホイール回転速度の低下に伴い増速機としてのギア比が徐々に小さくなれば、キャリアに接続し

ている電動発電機回転速度は一定に維持される。これによりエネルギー放出に伴いフライホイール回転速度が時間とともに低下しても、電動発電機回転速度は一定に維持される。よって、電動発電機はパワー半導体による電力変換器なしで 50/60Hz の電力系統に直接接続されている。

電動発電機をパワー半導体による電力変換器なしで電力系統に接続する方法は二重給電誘導発電機を用いた方式でも可能である。提案方式の利点は電動発電機としてかご形誘導電動機が使用できる点である。二重給電誘導発電機を用いた方式では電動発電機として二次巻線を有する比較的特殊な構造の巻線形誘導電動機が必要である。付帯設備について提案方式と二重給電誘導発電機を用いた方式はともにインバータを介さずに電力系統に接続が可能だが、二重給電誘導発電機を用いた方式では商用周波数の励磁用変圧器が殆どの場合が必要である。二重給電誘導発電機を用いた方式の二次側巻線は提案方式の制御モータに相当する。また、高速応答を実現するには励磁用変圧器の直流偏磁を抑制するなど比較複雑な制御が必要となる。よって、提案方式の付帯設備に特殊な装置が必要ない点に利点がある。しかし、提案方式は無効電力補償や高調波対策等の能力は無く、電圧維持の過渡応答性は二重給電誘導発電機を用いた方式に劣る。

2.2.2 制御モータの実験検証

Fig. 2 の 1 kW 級の装置を製作し、原理検証を行った。1 kW 級の装置を Fig. 4、主要な定格を Table 1 に示す。Fig. 4 に示すように 1 kW 級の装置では、フライホイールは円盤ではなく、プログラムで慣性を可変できる外部電源で駆動する電動機を用いてフライホイール模擬装置とした。

再生可能エネルギーの出力が低下又は発電量が需要を超えた場合に制御モータを使用してフライホイールから取り出すエネルギーを一定に保てるか実験を行った。電動発電機が電力系統に直接接続されており、サンギアが無限大慣性フライホイールの状態において、外部から制御モータを用いて遊星歯車機構のリングギアの回転速度を変化させた場合のフライホイール軸と電動発電機の電力を Fig. 5 に示す。Fig. 5 よりリングギアの回転速度制御によりフライホイール側から電動発電機側へ電力の授受が確認できる。また、リングギアの回転方向を逆にした場合も授受の方向が逆となる同様の結果が得られている。これより主たる電力系統にパワー半導体による

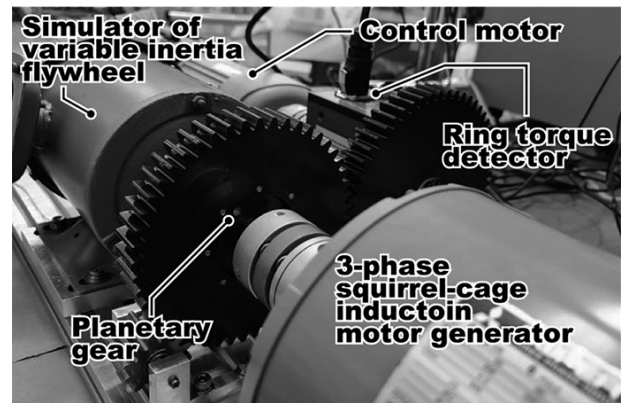


Fig. 4 External appearance of the 1-kW class experimental verification of the proposed system.

Table 1 Specifications of the 1-kW class experimental verification of the proposed system.

Rated speed	1000 min ⁻¹
Control motor	100 W IM with 1:20 speed reduction
Sun gear	48
planetary	24 * 3pcs
Ring intenal	96
Ring outer	50
Control gear	56

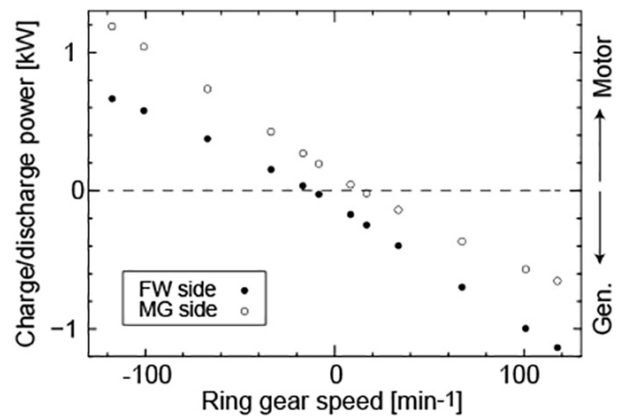


Fig. 5 Results of charge/discharge experiment from infinite flywheel using planetary gear by controlling ring gear speed.

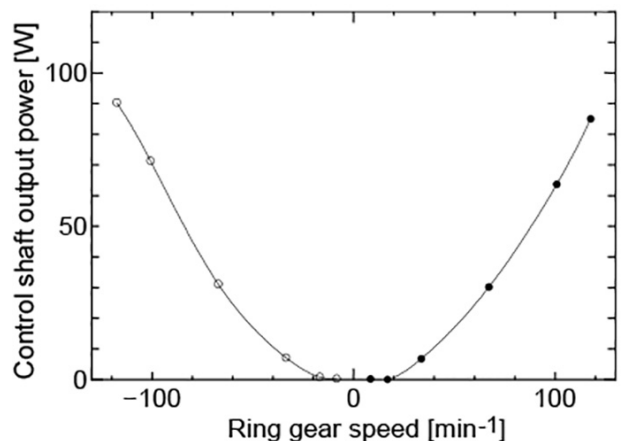


Fig. 6 Results of control shaft power of ring gear.

巨大な電力変換器を用いずフライホイールの充放電が可能であることが判る。次に充放電に必要となるリングギアの軸動力を Fig. 6 に示す。Fig. 6 は制御モータの入力電力ではなく、制御モータの鉄損、銅損を含まない軸動力である。電動発電機の充放電電力に対して 1/10 以下程度の制御動力となっている。この制御動力の一部は遊星歯車機構の摩擦損失になるが、それ以外は熱として消費されるわけではなく電動発電機の充放電電力に含まれている。

3. フリーラン試験による機械損失の比較

遊星歯車機構を搭載したことによる影響を調べるため Fig. 1, Fig. 2 の 10kW 級の装置を製作してアイドリング損失の比較、検討を行った。Fig. 1 の構成の外観を Fig. 7(a), Fig. 2 の構成の外観を Fig. 7(b) に示す。また、Table 2 に各構成の代表的な仕様を示す。これらの構成を用いて、フライホイールを約 3000min^{-1} 付近まで加速させ、フリーラン試験（自由減速試験）を実施した。実験結果を Fig. 8 に示す。Fig. 8 から遊星歯車搭載装置の方が自由減速時間は長くなっていることがわかる。この結果を整理すると構成の機械損失を求めることができる。まず、フライホイールが回転角速度 ω [rad/s] で回転しているときの蓄積エネルギー E [J] は慣性モーメント I [kgm²] とすると、式 (1) のように表すことができる。

$$E [\text{J}] = \frac{1}{2} I \omega^2 \dots (1)$$

ここで、自由減速時の機械損失 P_{loss} [W] は風損と軸受け損のみであるため、機械損失は式 (1) における E [J] の時間微分で式 (2) のように表される。

$$P_{\text{loss}} [\text{W}] = \frac{dE}{dt} = I \omega \frac{d\omega}{dt} \dots (2)$$

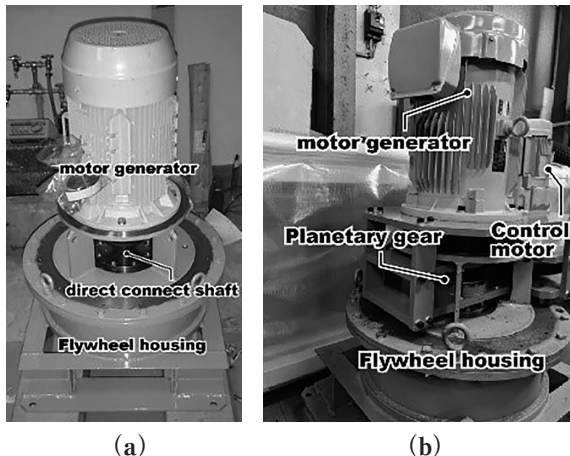


Fig. 7 External appearance of the flywheel system.

式 (2) を用いて機械損失を求めた結果を Fig. 9 に示す。Fig. 9 より遊星歯車搭載装置の方が機械系が複雑にもかかわらず全機械損失が低減されている知見を得た。機械損失が低減された理由は遊星歯車機構により電動発電機の回転角速度を低く抑えることが可能であるためと推測される。この要因をさらに詳しく分析するため、機械損失の内訳分離を行った。軸受け損 P_b [W] は回転角速度に比例し、風損 P_{win} [W] は回転角速度の 3 乗に比例する。したがって、Fig. 7 の回転速度対機械損失の特性曲線を軸受け損係数 α と風損係数 β を用いて表すと式 (3) のように表すことができる。

$$P_{\text{loss}} [\text{W}] = \alpha \times \omega + \beta \times \omega^3 = P_b + P_{\text{win}} \dots (3)$$

軸受け損 P_b [W] と風損 P_{win} [W] の分離結果を Fig. 10 に示す。Fig. 10 より、損失係数を比較すると各装置の軸受け損は約 6 %、風損は約 10 % の差

Table 2. Photophysical data for complexes 1a-e.

	Fig.7 (a)	Fig.7 (b)
Flywheel [min ⁻¹]	3000	3000
Flywheel inertia [kgm ²]	6.73	6.73
Motor generator [min ⁻¹]	3000	1000
Polar	2	6

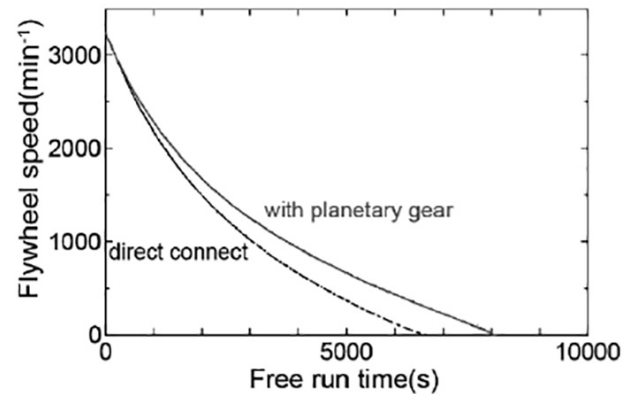


Fig. 8 Free run test results of the flywheel systems.

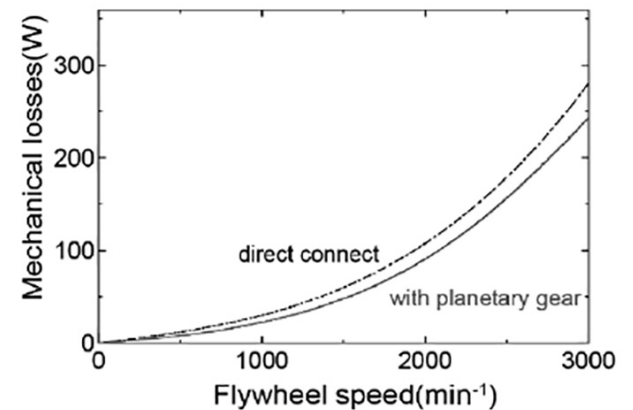


Fig. 9 Free run test results of the flywheel systems.

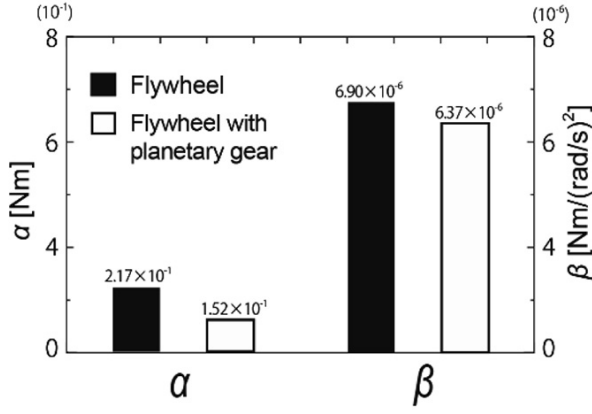


Fig. 10 Comparison of mechanical loss factors.

がある。よって、遊星歯車機構による機械摩擦に由来する機械損増加分より電動発電機が低速になったことによる軸受け損・風損低減分が上回り、全体として損失が約 10% 低減したことがわかった。

4. 風損の低減について

Fig. 11 に遊星歯車機構搭載装置の全機械損失の内訳を示す。Fig. 11 より、フライホイールが 3000 min^{-1} のとき全機械損失の約 70% を風損が占めていることがわかる。今後は損失の大部分を占める風損低減を行う予定である。風損低減ではフライホイール容器内を真空状態にするのが一般的だが、付帯設備が大型化する。そこで、He ガスを適用し実験検証を行う予定である。He は水素に次いで軽く、理想気体に最も近い気体である。化学的に非常に安定で他の元素と化合物を作らず、水素と異なり引火による爆発の危険性がない。また、He の分子量・気体密度は空気と比較して約 1/7 程度であり、このことから非常に軽い気体であることがわかる。ヘリウム・空気混合ガスの密度は、気体の重量比から式 (4) のように求めることができる。

$$\rho_{\text{mix}} = \rho_{\text{He}} \times \frac{\text{vol\%He}}{100} + \rho_{\text{Air}} \times \frac{\text{vol\%Air}}{100} \quad \dots (4)$$

式 (4) から明らかなように、ヘリウム濃度の増加に伴い、ヘリウム単体 (100 vol% He) での気体密度に向かって単調に減少する。混合ガス粘度 η_{mix} [kg/m · s] は式 (5), (6) で求めることができる。

$$\eta_{\text{mix}} = \sum_{i=1}^n \frac{x_i \eta_i}{\sum_{j=1}^n x_j \Phi_{ij}} \quad \dots (5)$$

$$\Phi_{ij} = \frac{1}{\sqrt{8}} \left(1 + \frac{M_i}{M_j} \right)^{-\frac{1}{2}} \left\{ 1 + \left(\frac{\eta_i}{\eta_j} \right)^{\frac{1}{2}} \left(\frac{M_j}{M_i} \right)^{\frac{1}{4}} \right\}^2 \quad \dots (6)$$

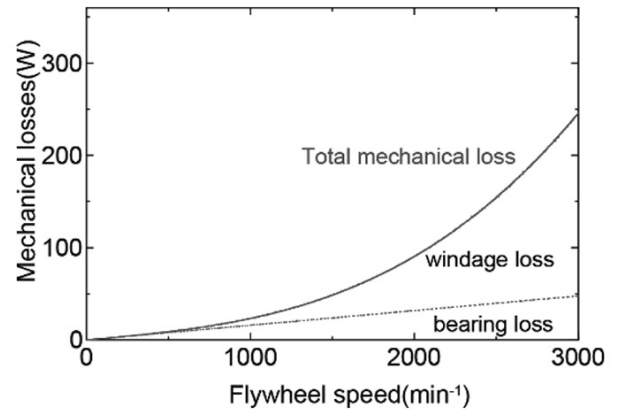


Fig. 11 Rotation speed mechanical loss characteristic curves of planetary gear equipped system.

ヘリウム・空気混合ガス中での損失を求めるために、レイノルズの相似則を用いる。フライホイールの角速度 ω [rad/s]、直径 D [m]、混合ガス動粘度 ν [m²/s] とすると、レイノルズ数 Re は式 (7) で表される。

$$Re = \frac{\omega \left(\frac{D}{2} \right)^2}{\nu_{\text{mix}}} \quad \dots (7)$$

混合ガス動粘度 ν_{mix} は、混合ガス粘度 η_{mix} と混合ガス密度 ρ_{mix} を用いて式 (8) で求められる。

$$\nu_{\text{mix}} = \frac{\eta_{\text{mix}}}{\rho_{\text{mix}}} \quad \dots (8)$$

フライホイールの風損の規格化損失を P_{normal} [W] とすると、フライホイールの風損 P_{low} [W] は式 (9) で求めることができる。

$$P_{\text{low}} = P_{\text{normal}} \times \rho_{\text{mix}} \times \omega^3 \left(\frac{D}{2} \right)^5 \quad \dots (9)$$

各種フライホイール形状におけるレイノルズ数と規格化損失の関係は文献 (11) において測定されている。遊星歯車機構搭載装置において、フライホイールが 3000 min^{-1} でのヘリウム濃度と風損の理論値の関係を導出すると Fig. 12 のようになる。よって、フライホイール容器内を He ガスで満たすことで、風損を低減できると考える。

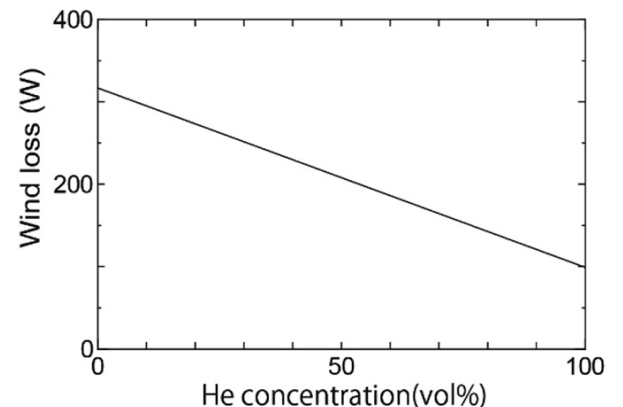


Fig. 12 Theoretical helium concentration and wind loss.

5. まとめ

フライホイールと電動発電機の両軸を直結した装置よりも両軸を遊星歯車機構で連結した装置の方が全機械損失を約10%低減可能であることがわかった。これより、電動発電機の回転速度を低く抑え、フライホイールの回転速度は高速化が適しているといえる。電動発電機の回転速度を低く抑えるには、フライホイールと電動発電機の軸をギア比の異なる歯車を用いれば可能である。しかし、フライホイールと電動発電機の両軸を同心軸にできないため装置が大型化してしまう。また、フライホイールの回転速度にその都度設計しなければならない。遊星歯車機構であればそれぞれの軸の同心軸化、電動発電機の回転速度の低速化、装置のコンパクト化が可能である。前述したように遊星歯車機構は大半のオートマチック車の駆動装置やトヨタのハイブリッド車に搭載されていることから既存の製品の使用が可能である点にメリットがある。さらに、フライホイールと電動発電機の回転速度は切り離して考えることが可能なため、フライホイールの回転速度を高速化しても遊星歯車機構の定数を設計変更すれば電動発電機の回転速度は依然として低速を維持することができる。

今後は損失の大部分を占める風損低減には付帯設備が大型化する真空よりも分子量・気体密度の観点からHeガスを適用し実験検証する予定である。

参考文献

- 1) 高木邦子：需要家の脱炭素，新興企業が担うー再生可能エネルギーを使いやすく，蓄電池に脚光。日経ESG，2024年/4号（2024），pp16-17

- 2) 松川誠：「核融合炉システムにおけるパワーフロー」，プラズマ・核融合学会誌，Vol80，No.7（2004），pp 559-562
- 3) 嶋田隆一：「原動機のない発電機」，電気学会誌，123巻，5号，pp 275-277（2003）
- 4) H. Chikaraishi, M. Arimitsu, Y. Wang, S.Uemura, R. Shimada: “Fast Re-sponse Power Stabilizer using the AC-Excited Flywheel Generator”, *IEEJ Trans. IA*, Vol. 113-D, No. 11, pp1254-1261（1993）（in Japanese）
- 5) 島津・橘：「京浜急行電鉄（株）納め電車線用フライホイール発電電動機」，三菱電機技法，63，8，p.60（1989）
- 6) M. Murayama : “Design and Implementation of DC Pulsed Power Supply Employing Self-Excited Induction Generation and Flywheels for Toroidal Field Coils of a Tokamak Device, PLATO”, *IEEE Trans. on AS*, Vol. 30, No.4（2020）
- 7) 加藤，他：「フライホイール誘導発電機による瞬低保護装置とエンジン発電機併設によるUPS」，電学論D127巻，8号，pp.844-850（2007）
- 8) 加藤：「フライホイール電動発電機の各種電源への応用」，電気学会産業応用部門半導体電力変換/自動車合同研究会，2022年12月
- 9) 加藤，他：「遊星歯車機構を備えたフライホイール電動発電機のリングギア回転速度制御による充放電装置」，電気学会全国大会，4-180（2023）
- 10) 野崎博路：「新世代の自動車のしくみ」，マイナビ出版，ISBN：4839978816（2022）
- 11) Ajisman, “A Study of Loss Reduction of Flywheel Energy Storage System”，東京工業大学博士論文，2001.

（R6.6.17受理）

Biographical Sketches of the Authors



Keigo MIYAMOTO is a master course student of Department of Electrical and Electronic Engineering, College of Industrial Technology, Nihon University. He obtained his bachelor's degree of Engineering in 2023 from Nihon University. His research interest is uninterruptible power system with flywheel energy storage.



Shuhei KATO is an associate professor of Department of Electrical and Electronic Engineering, College of Industrial Technology, Nihon University. He received his Doctoral Degree of Engineering in 2009 from Tokyo Institute of Technology. He received the IEEJ Excellent Presentation Award in 2006, 2008, 2018, 2019. His research interests are flywheel energy storage, widespread use of renewable energy, and automotive power converters.