

遊星歯車を備えたフライホイール発電機による充放電装置の風損低減に関する研究

日大生産工 (院) ○HUANG JIAQI 日大生産工 加藤 修平

1. まえがき

将来的に開業予定のリニア中央新幹線は、最高速度 500 km/h での運転が計画されており、その発着時には大規模な電力の供給および回生が発生する。このとき発生する急激な電力変動は電力系統に擾乱を与える可能性があるため⁽¹⁾、エネルギーバッファの導入が重要である。

本研究では、遊星歯車を介してフライホイールと発電機を接続した充放電装置⁽²⁾に着目する。この装置は双方向電力変換器（機能的にはインバータ）を用いずとも、フライホイールの回転数変化を吸収しつつ、発電機は常に 50 Hz で回転可能である特長を有する。

本稿では、装置の実用化に向けた課題の一つである待機時の風損に着目し、軽量不活性ガスであるヘリウム (He) を用いた損失低減手法とその効果を報告する。

2. 提案手法

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。

提案する遊星歯車を備えたフライホイール発電機の 10 kW 級装置の外観図は Fig.1 に示す。

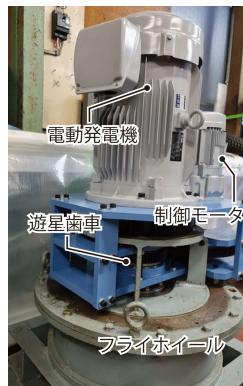


Fig.1 装置の外観

10 kW 級のフライホイール充放電装置⁽²⁾を用いて自由減速（フリーラン）試験を実施し、総機械損失を回転数変化から評価した。

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。

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

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

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

式(2)を用いて機械損失を求めた結果を式(3)で機械損と風損の分離を行った。

$$\begin{aligned} P_{\text{loss}}[W] &= \alpha \times \omega + \beta \times \omega^3 \\ &= P_b + P_{\text{wind}} \end{aligned} \quad (3)$$

全機械損失の内訳は Fig.2 に示す。回転数 3000 min⁻¹ において、総損失の約 70% が空気による風損であることが明らかとなった。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。

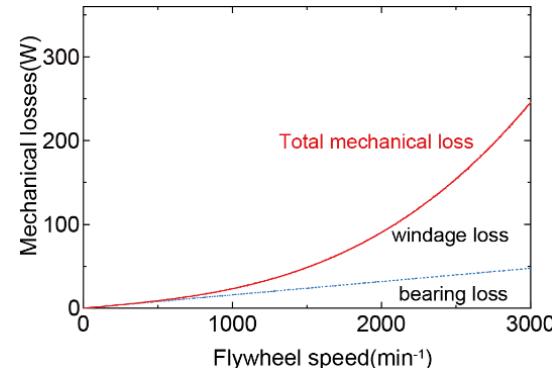


Fig.2 遊星歯車搭載装置の全機械損失の内訳

Study on Reduction of Windage Loss in Charging and Discharging System with Flywheel Generator Equipped with Planetary Gears

Jiaqi HUANG, Shuhei KATO

一般に風損低減には真空封止が有効であるが、装置の大型化やコスト増を招く問題がある。そこで本研究では、水素に次ぐ軽さと安全性を両立するヘリウムガスをフライホイールハウジング内に封入し、風損の低減効果を検証する。

3. 実験方法および測定方法

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、このことからも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。

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

式(2)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。

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

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

ヘリウム・空気混合ガス中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。

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

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。

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

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_{ω} [W] は式(7)で求めることができる。

$$P_{\omega} = P_{\text{normal}} \times \rho_{\text{mix}} \times \omega^3 \left(\frac{D}{2} \right)^5 \quad (7)$$

4. 実験結果および検討

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(3)において測定されている。遊星歯車機構搭載充放電装置において、フライホイールを 3000 min⁻¹ を基準に、±600 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.3 のようになる。

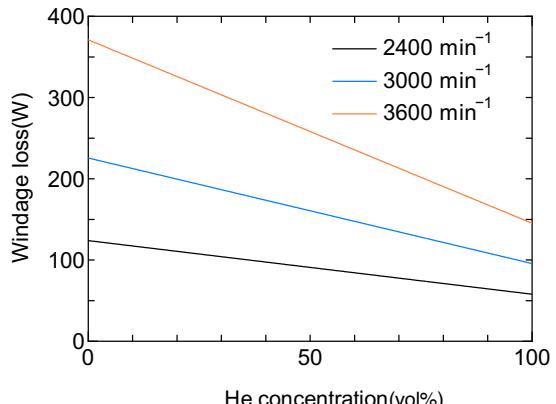


Fig.3 ヘリウム濃度と風損理論値

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。

5. まとめ

本研究では、遊星歯車式フライホイール発電機における風損低減策として、ハウジング内への He ガス封入する方法を検討した。理論値による結果、待機時の風損が最大で数十%低減されることが考えられる。

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) 加賀,他:「山梨リニア実験線用 電力変換設備」,東芝 レビュ一, Vol.52, No.11(1997) pp.24-26
- 2) 加藤 修平, 塩島 大輔, 川口 卓志:「フライホイール発電機と遊星歯車による停電対策装置の実験検証」,電気学会論文誌D (産業応用部門誌), No.144(2024) pp.739-745
- 3) Ajisman, "A Study of Loss Reduction of Flywheel Energy Storage System", 東京工業大学博士論文, 2001.