

令和 3 年 5 月 26 日現在

機関番号：32660

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2018～2020

課題番号：18K04108

研究課題名(和文) 慣性モーメント可変フライホイールの同期機への適用

研究課題名(英文) Application of a variable inertia flywheel to a synchronous machine

研究代表者

近藤 潤次 (Kondoh, Junji)

東京理科大学・理工学部電気電子情報工学科・准教授

研究者番号：20357049

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,100,000円

研究成果の概要(和文)：インバータや誘導機により連系する太陽光発電や風力発電の導入が進むと、電力系統内の慣性が減り、系統周波数の変化が激しくなる懸念がある。この対策として、系統連系している同期発電機や同期調相機に「慣性モーメント可変フライホイール」を組み込み系統周波数を安定化させることを提案した。本助成事業の実施前にも慣性モーメント可変フライホイールを開発していたが、入手が容易で連系運転も容易な誘導機を用いていた。本助成事業では、同期機を用いても慣性モーメントを変化させることで充放電できることを示した。また、慣性モーメントの変化をフライホイール自身の慣性トルクを利用する構造にすることで損失低減を行った。

研究成果の学術的意義や社会的意義

太陽光発電や風力発電は発電時に地球温暖化ガスや危険物質を排出しない国産の再生可能エネルギーであるが、これらの導入が進むと、電力系統の安定運用に支障をきたす恐れがある。その問題の一つである周波数変動問題を改善する手段として、「同期機を用いた慣性モーメント可変フライホイール電力貯蔵装置」の開発に取り組んだ。通常のフライホイール電力貯蔵装置は周波数変換器を介して系統連系するので電力系統の慣性向上にほとんど寄与しないが、本提案装置であれば同期機を用いて電力系統に直結するため、電力系統の慣性向上に寄与する。本研究では、同期機で連系した装置構成でも充放電できることを試作機により確認した。

研究成果の概要(英文)：As the increase of photovoltaic power generation and wind power generation, which are interconnected by inverters or induction machines to the electric power system, there is a concern that the inertia in the power system will decrease and the system frequency will change drastically. As a countermeasure, I proposed to incorporate a "variable inertia flywheel" into synchronous generators and synchronous phase modifiers that are interconnected to the grid to stabilize the grid frequency. Before this project was implemented, a variable inertia flywheel had been developed, but an induction machine that was easy to obtain and easy to operate in interconnection was used. In this project, charging and discharging can be performed by changing the moment of inertia even if a synchronous machine is used. In addition, the power loss was reduced by adopting a structure that utilizes the inertial torque of the flywheel itself to change the moment of inertia.

研究分野：電力工学

キーワード：フライホイール 慣性モーメント 同期機 系統連系 周波数 電力貯蔵 充放電 乱調

1. 研究開始当初の背景

- (1) 電力系統の周波数は、従来の大規模発電（火力・水力・原子力発電）で用いられている同期発電機の回転数に比例する。電力系統全体での発電と消費が釣り合っていないと、同期発電機の回転数が変化、すなわち周波数が基準値（50 Hz または 60 Hz）から逸脱してしまう。実際には、不釣り合いになったとしても瞬時に周波数が急変することはない。その理由は、系統連系している同期機の回転子やタービンには慣性モーメントがあり、それらが回転することで蓄えられる運動エネルギーがバッファとなり、回転数の急変を抑制するためである。近年、太陽光発電や風力発電の電力系統への導入が世界的に進んでいるが、これらはインバータや誘導発電機のような、慣性による周波数急変の抑制効果がほとんど期待できない装置により連系連系する。電力系統の全発電設備に対するこのような電源の割合を「系統非同期率」という。系統非同期率が上昇すると、電力系統内の慣性が減り、系統周波数の変化が激しくなる。この対策として、電力系統につながる同期機及びその回転軸に直結する回転体の慣性モーメントを大きくすることが挙げられる。
- (2) 上記の需給調整を担う装置として電力貯蔵装置がある。電力貯蔵装置にはいくつかの種類があるが、その1つであるフライホイール電力貯蔵装置は、慣性モーメント J を有するフライホイールを角周波数 ω で回転することで $J\omega^2/2$ の運動エネルギーを蓄える。従来のフライホイール電力貯蔵では、角周波数 ω を変化させることで蓄積エネルギーを充放電させるが、そのためには周波数変換器を介して系統連系する必要がある。すなわち、(1) で述べたように、系統の慣性向上に寄与しない。
- (3) そこで本研究では、角周波数 ω_s は一定に維持し、慣性モーメント J を変化させることで充放電を行う慣性モーメント可変フライホイールを同期機を介して系統連系することで、(1) で述べた系統の慣性向上にも寄与する電力貯蔵装置を提案した。

2. 研究の目的

本助成事業の実施前にも慣性モーメント可変フライホイールを開発していたが、入手が容易で連系運転も容易な誘導機を用いていた。また、慣性モーメントを変化させるために電動ウィンチを用いていたが、その効率が低いため、放電動作時に正味の放電電力を正值にすることを実現できていなかった。本助成事業では下記を目的とした。

- (1) 発電電動機に誘導機でなく同期機を用いても充放電できることを実証する。
- (2) 慣性モーメント制御装置の仕組みを代えて効率向上し、放電動作時に正味の放電電力を正值にする。

3. 研究の方法

上記目的の(1),(2)を達成するため、新規に設計・製作する試作機を用いた実験を行った。

- (1) 同期機は定格出力 1.5 kW 定格電圧 200 V 50 Hz 同期回転速度 1500 rpm(4 極)の三相交流同期機を用いた。フライホイールの定格回転速度が 500rpm であることから、当初は減速比 3 の減速機を用いる予定であったが、入手できた減速機での電力損失が大きかったことと質量が重く装置バランスの問題があったことから、減速機は外した。発電電動機の回転軸は減速機を介さずにフライホイールに連結し、その電機子巻線は商用系統にはつながず、100 V 16.7 Hz を供給できる三相電源につなぎ、同期回転速度 501 rpm で運転した。
- (2) 慣性モーメント可変フライホイール(仕様を表 1 に示す)は遠心调速機のような構造をしており、図 1 の可動片を上下に動かすことで慣性モーメントが変化する。試作機では図 1 のように、ボールねじと電磁クラッチと電磁ブレーキを用いて、フライホイール自身の慣性トルクにより慣性モーメント制御できる構造とした。

4. 研究成果

試作機を用いて充放電運転を行った結果の一例を図 2 に示す。トルク τ (フライホイールが負荷となる方向が負) と回転速

表 1 フライホイールの仕様⁽¹⁾

項目	値
アームの数	4 本
アームの長さ	250 mm
おもりの数	4 個
おもりの重さ	1 kg/個
設計最大回転速度	500 rpm
軸方向ストローク	210 mm / 5sec
フライホイール最小半径	210 mm
フライホイール最大半径	280 mm

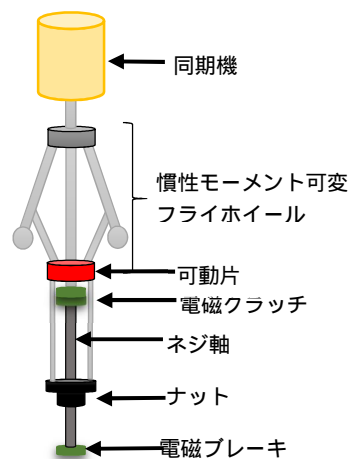


図 1 試作機の構造⁽¹⁾

度 $\omega/2\pi$ は同期機とフライホイールの間に取り付けられたトルクメータで測定した。引張力 F_z は可動片とナットの間の 2 本の連結軸にかかるものであり、それぞれロードセルで測定した。可動片の位置 L はレーザー距離計によって測定し、最下部にある状態を 0mm とした。同期機の実出力電力 P は電力計で計測した。

0~4.1 秒は可動片が最下部にある満充電状態での空転期間で、その後電磁ブレーキをリリースした 4.1~23 秒は充電期間である。23~35 秒は可動片が最上部にある満充電状態での空転期間で、35~40 秒で放電動作をし、それ以降は再び可動片が最下部にある満充電状態での空転期間である。

まず、充放電期間において、可動片の位置 L が変化、すなわちフライホイールの慣性モーメント

が変化することで、同期機の電力を変化できていることが分かる。図 2(C)より、充電期間では同期機出力 P は理論通り負値である。放電期間においては逆に、本来は同期機出力 P は正値でなければならないが、フライホイールから同期機への機械出力 $P_m (= \omega\tau)$ は 40 秒付近でちょうど正値となったが、それ以外の時間は負値であったし、同期機からの出力 P はずっと負値であった。その理由として、まず放電期間は電磁クラッチをオンしてボールねじのネジ軸をフライホイールと共に回転させナットを下げ、これにより可動片を下げるのだが、ボールねじでの摩擦損（ネジ軸とナットの間の摩擦損とネジ軸を支えるベアリングでの摩擦損）およびフライホイールの可動部の摩擦損が挙げられる。別の実験で、ボールねじを回転させるための摩擦トルクを 1.35 Nm と測定しており、501 rpm で回転しているため 70.8 W の損失に相当する。その他の理由として、フライホイールの風損があり、こちらは 18 W と見積もられる。これらの損失が無ければ、機械出力 P_m のみならず、同期機出力も正値を達成できたと言える。

なお、特に充放電動作開始後に、トルクや出力に振動が見られる。これはトルクが急変したことにより生じた同期機の乱調で、誘導機で実験していた際には現れなかった現象である。同期機を適用する場合は、この乱調の低減対策が必要になると考えられる。

< 引用文献 >

- (1) 山本卓海, 長塚勝利, 小平大輔, 近藤潤次: 「自己慣性可変型固定速フライホイール電力貯蔵装置への同期機の適用」, 令和 3 年電気学会全国大会, 7-048, pp.81-82 (2021.3)

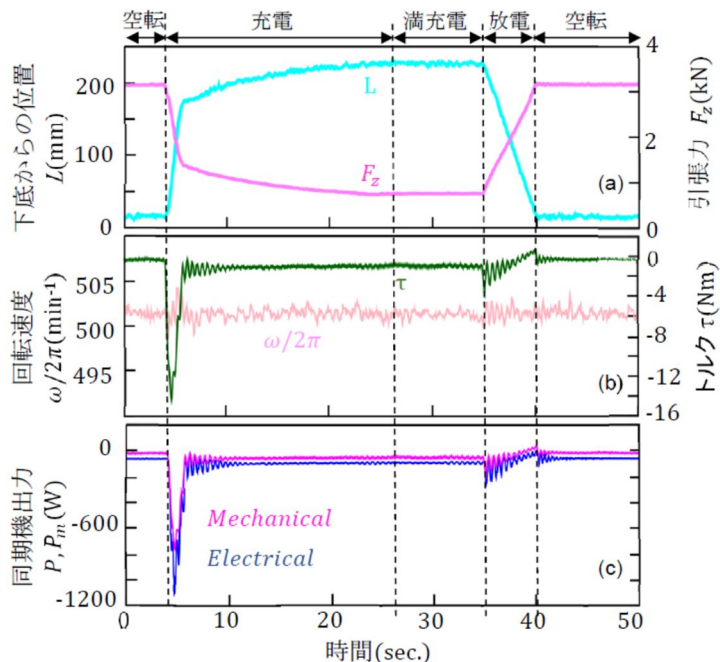


図 2 充放電測定結果⁽¹⁾

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計2件（うち査読付論文 2件 / うち国際共著 0件 / うちオープンアクセス 0件）

1. 著者名 Takumi Yamamoto, Junji Kondoh	4. 巻 -
2. 論文標題 Self-Inertia-Varying Fixed-Speed Flywheel Energy Storage System	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 IEEJ Journal of Industry Applications	6. 最初と最後の頁 -
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） なし	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Yamamoto Takumi, Kondoh Junji	4. 巻 -
2. 論文標題 Development of a self-inertia-varying fixed-speed flywheel energy storage system	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 23rd International Conference on Electrical Machines and Systems (ICEMS)	6. 最初と最後の頁 1169-1172
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.23919/ICEMS50442.2020.9291150	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

〔学会発表〕 計3件（うち招待講演 0件 / うち国際学会 0件）

1. 発表者名 山本卓海, 近藤潤次
2. 発表標題 自己慣性可変型固定速フライホイール電力貯蔵装置の開発
3. 学会等名 令和2年電気学会電気学会全国大会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 山本卓海, 長塚勝利, 小平大輔, 近藤潤次
2. 発表標題 自己慣性可変型固定速フライホイール電力貯蔵装置への同期機の適用
3. 学会等名 令和3年電気学会電気学会全国大会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 長塚勝利, 山本卓海, 小平大輔, 近藤潤次
2. 発表標題 自己慣性可変型固定速フライホイール電力貯蔵装置の損失分析
3. 学会等名 2020年(令和2年)第16回電気学会東京支部千葉支所研究発表会
4. 発表年 2021年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

近藤研究室 https://www.rs.tus.ac.jp/j.kondoh/
--

6. 研究組織		
氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8. 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関
---------	---------