

令和 6 年 5 月 22 日現在

機関番号：32621

研究種目：基盤研究(C)（一般）

研究期間：2019～2023

課題番号：19K04356

研究課題名（和文）超伝導誘導回転機の電力機器応用のための基礎研究

研究課題名（英文）Basic research on superconducting induction rotating machines for electric power equipment applications

研究代表者

高尾 智明（TAKAO, Tomoaki）

上智大学・理工学部・教授

研究者番号：30245790

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 3,400,000円

研究成果の概要（和文）：本研究は誘導回転機の2次巻線を高温超伝導（HTS）線で構成した超伝導誘導回転機（SIM）の動作特性を実験及び数値シミュレーションにより解析した。主要応用分野として、フライホイール型瞬時電圧低下補償装置（FWUPS）、風力発電機（WPG）への応用について、1）試作した液体窒素冷却3kW級SIMにより、2次巻線捕捉磁束によるUPS動作を実証し、3MVA級FWUPSについて数値シミュレーションによりその実現可能性を示した。2）5MVA級のSIMを用いたWPGの実現可能性を数値シミュレーションにより示した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

大型のUPSは電池式、フライホイール式に関わらず高価な半導体電力変換装置を必要とする。これに対して、SIMを用いたFWUPSは構造が簡単で、電力変換装置を用いず、電源ラインにつないでおくだけでUPS効果が得られるため、導入コストの低減が期待できる。また、SIMを用いることにより軽量の大型風力発電装置の実現が期待できる。

本研究により、大型UPS、WPGへのSIMの適用性が示され、社会的意義は大きい。また、SIMの動的特性を解析する数値シミュレーションモデルが開発され、学術的意義もある。

研究成果の概要（英文）：In this research project, dynamic characteristics of a superconducting induction machine with high temperature superconducting (HTS) secondary windings (SIM) are investigated by experiments and numerical simulation, and feasibility studies are conducted on the applications of SIM to fly-wheel-UPSs (FWUPS) and wind power generator (WPG). The results are summarized as follows. 1) UPS function was experimentally shown using an experimental model of 3 kW class SIM with Bi2223 HTS iron-cored secondary and Cu armature windings cooled by liquid nitrogen. 2) feasibility of a large-scale FWUPS using SIM is investigated based of a conceptual model of 3 MVA SIM and its feasibility was shown. 3) a conceptual model of WPG using 5 MVA class SIM is designed and feasibility of the SIM-WPG is shown.

研究分野：超伝導工学

キーワード：高温超伝導 超伝導誘導機 UPS 風力発電

1. 研究開始当初の背景

SIM は、従来の回転機と比較し次のような特長を持つ。1) 通常の誘導機と違い、すべりが 1 から 0 の全域にわたって大きなトルクを発生する。従って、高価な周波数変換器を用いなくても任意の周波数の電源で起動し、安定な運転が可能である。2) 同期速度に近づくと同期引き込みが起こり、界磁励磁電源を必要としない超伝導同期機として振舞う。3) 同期運転状態では回転子にかかるトルクの向きにより電動機動作か発電機動作になる。4) 電源電圧が喪失しても 2 次巻線には超伝導電流が維持され磁束が保持されるため回転慣性により発電する。5) 少ない損失で 2 次巻線の電流密度を高くできるため、高効率コンパクトな機器の実現が可能になる。

以上のような特長を持つ SIM は、風力発電機、瞬時電圧低下補償装置、電力系統電圧安定化装置等の電力機器への新しい応用が考えられる。しかし、SIM の電動機応用研究開発は我が国を始め世界で多く行われているにもかかわらず、発電動作にも注目した電力機器応用の研究はほとんどなかった。

風力発電機に関して、現在広く誘導発電機が用いられているとはいえ、超伝導型機の開発となるといずれも同期機型である。同期超伝導発電機型では電力変換器、及び多くの量の HTS 線が必要となり、また回転子側への電流供給の必要性等により低温容器の構造が複雑となり、高コストのため実現性が低いと考えられている。これに対して、SIM 型では、HTS 線の量は大幅に削減でき、電力変換器を必要とせず、さらに回転子側への電流供給も不要で、回転子用の低温容器の構造も簡単となりコスト的な問題は大幅に緩和できると期待できる。

従来、超伝導軸受けを用いた高速回転フライホイール型の超伝導エネルギー蓄積装置の開発は行われている。しかし、秒単位以下の瞬時電圧低下を補償する装置では大きなエネルギーを蓄積する必要はなく、高価なフライホイール型超伝導エネルギー蓄積装置を用いる必要性は少ない。これに対して、工場内電源につながだけで済むフライホイールを接続した SIM 型の瞬時電圧低下補償装置 (FWUPS) は低コストで実現ができる。特に、系統の電力品質が不十分で瞬時電圧低下が頻発する新興国や発展途上国において、工場生産ラインの電源補償装置として適していると考えられる。

2. 研究の目的

本研究は、図 1 に示すような電源系・SIM・機械系を統合したシステム全体としての特性を解明し、有望な新しい SIM 電力応用機器の具体例を挙げて、その特性

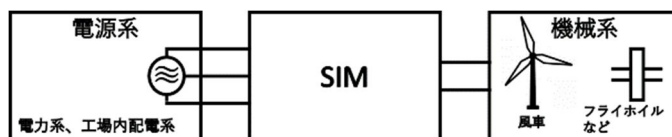


図 1. SIM を介した電源系、機械系結合システム

研究を行うことを目的としている。下記に具体的な目的を示す。

SIM 運転時の内部状態の実験および解析による解明

SIM の機械系側および電源系側の入出力特性の解明

上記基礎的研究結果を基に SIM の特性を活かせる具体的な応用機器の特性検討

3. 研究の方法

(1) 解析モデルの構築

上記、～ の研究目的に対応して、2 種類の解析ソフト (MATLAB/SIMLINK 及び PSIM) を用い SIM の数値シミュレーションモデルを作った。まず、SIM の動的特性、入出力特性を解析するために、SIM を電気側端子と機械側端子を持つ 2 相の電気・機械回転エネルギー変換装置 [1] と考え、機械的入出力と電気的入出力の関係を示す微分方程式を構成した。それに基づき、伝達関数で記述したモデルを作り、MATLAB/SIMLINK により解析した。ただし、本方法は電源側の端子にインダクタンスやキャパシタンスを含むインピーダンスが接続された場合の解析には適していない。そのため、このような場合に対応できる回転機用に開発されたソフト PSIM を用いて電気側端子にインピーダンスがつながれている場合の解析を行った。一方、PSIM では機械端子側に負荷に関して制約があるため、解析の目的によってこれらのソフトを使い分けた。

(2) 3kW 級 SIM 実験装置

SIM の動作特性を調べるために、企業との共同研究で、市販の 1.5kW 誘導機のロータを改造

し制作した4極3kW級SIM(Bi系HTS2次巻線,銅電機子巻線,液体窒素浸漬冷却,出力は推定値)に,機械的入力を模擬するためのPMモータと接続した装置を作った(図2)。PMモータで負荷トルク,回転数を制御して実験を行った。

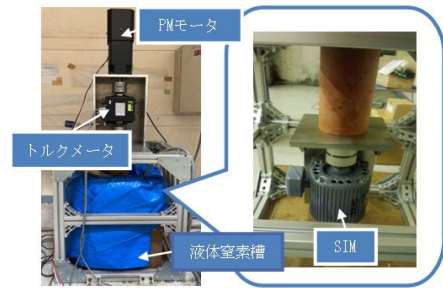


図2. SIM 実験装置

4. 研究成果

本研究で試作したSIM実験装置及び数値解析モデルにより, SIMを用いたFWUPSおよび風力発電装置(WPG)の実現可能性研究を行った。

(1) SIMを用いたFWUPS [2,3]

実験によるUPS機能

の検証

試作SIM(4極機)に抵抗負荷を三相接続した図3に示すような回路を構成し,UPS動作を検討した。実験ではFWを模擬するためにPMモータを用い,FWの慣性は十分大きいとしてPMモータの回転数は同期速度で一定とした。実験は,まず線間電圧100V(各相電圧58V)を,切り替えスイッチをONにしてSIMに加えた。SIMの回転数が同期引き込みにより1500rpmに達し定常状態になったところで,切り替えスイッチをOFFにして電源を切り離しUPSモードにした。その後,2.5秒後に再び切り替えスイッチをONにした。図4に示すSIMの回転数,出力,U相端子電圧のグラフからわかるように,UPSモードではSIMは負荷抵抗に電力を供給し,電源が復活した後,定常状態に短時間で戻っている。このように,SIMは電源がOFFになっても2次巻線の捕捉磁束により発電し,UPS効果があることが確認された。ただし,図4からわかるように,UPSモードの時には電流が逆転し,そのためSIMの内部インピーダンスにより端子電圧が降下している。このための対策にはキャパシタの挿入が必要となる。電圧降下の対策は今後の課題である。

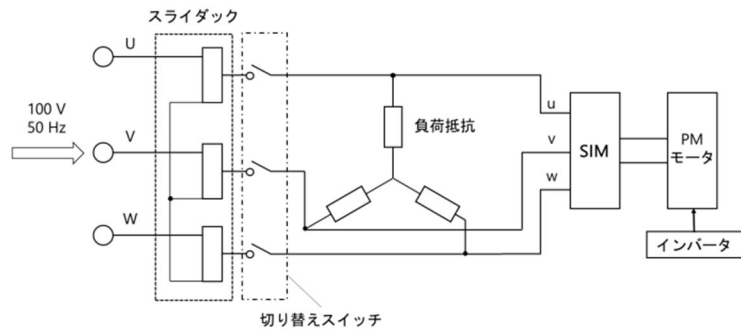


図3. SIM 試験装置を用いたUPS実験回路

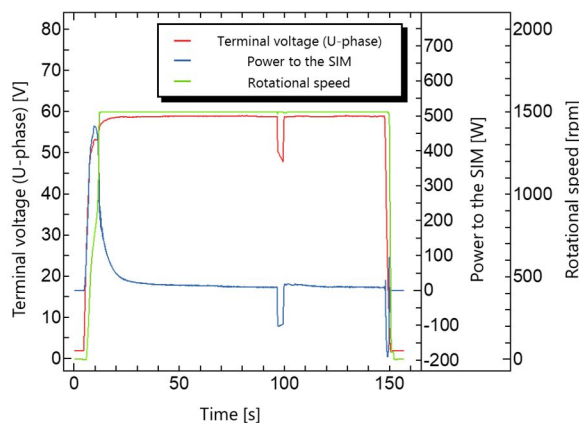


図4. UPS試験時のSIMの回転数,出力,U相端子電圧の時間変化

電圧降下の対策は今後の課題である。

SIMを用いた3MVA級FWUPSの数値シミュレーション

図5のような構造の2極3MVA級SIM(端子間電圧6KV,鉄心,室温銅電機子巻線,液体窒素冷却HTS-2次巻線)を概念設計し,回転機ソフトウェアPSIMを用い,FWの慣性モーメントを考慮したUPS動作の数値シミュレーション解析を行った。本解析ではUPSモード移行時の電圧変動を抑えるために,負荷に並列にコンデンサを入れた。

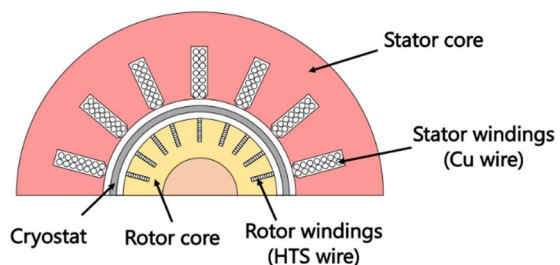


図5. 2極3MVA級SIM概念設計機の断面構成

図 6 は UPS モードにおける SIM の端子電圧の時間変化を示したものである。電源電圧が喪失した 0-3s の間 UPS モードになり、その間の電圧波形位相の連続性が保たれ、FW の回転慣性エネルギーの低下に伴う電圧低下は最大 5% 程度となっている。このように、SIM を用いた大型の FWUSP が機能することが示された。

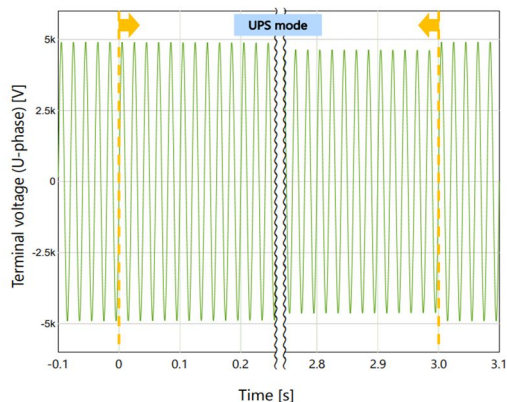


図 6 . UPS モード (0 - 3s の間) の SIM-U 相の電圧の時間変化

(2) SIM を用いた WPG [4]

5MW 級の SIM を用いた WPG を概念設計した。概念設計機の断面図を図 7 に、SIM の仕様を表 1 に示した。それを基にトルク変動に対する過渡応答、およびフォールトライドスルー (FRT: 系統電圧の瞬時的な低下後、元に戻ったときに速やかに出力が回復すること) 特性を数値シミュレーションにより調べた。

表 1. 風力発電用 SIM の仕様

出力	5MW/6.6kV/694A/3φ
周波数	50Hz
回転速度	150rpm
固定子極数	40 極
運転温度	77K
有効長	645mm

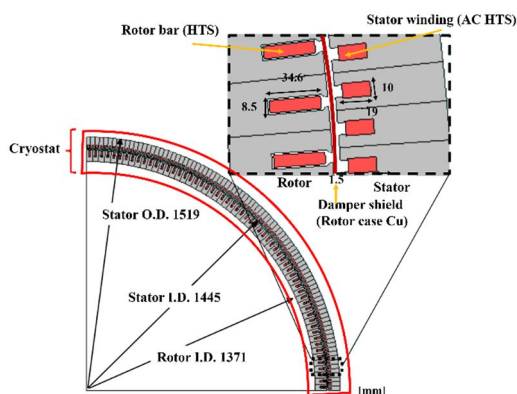
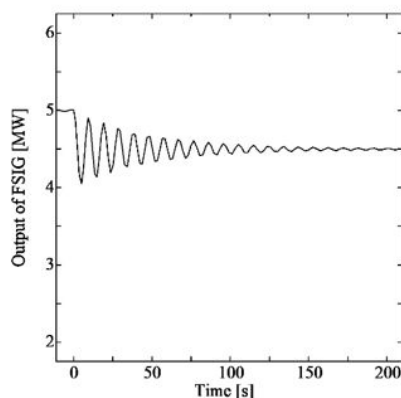


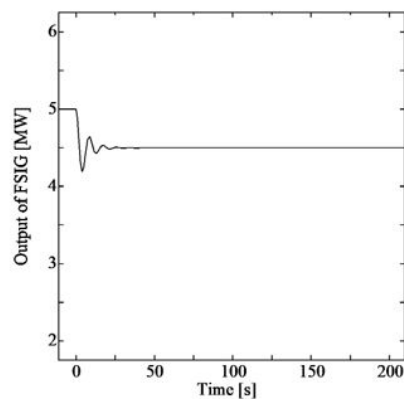
図 7. SIM 風力発電概念設計機断面構成

風力の変動による出力の過渡応答

図 8 (a) はステップ状の風力変動に対する SIM-WPG の出力の過渡応答で、このように減衰の悪い振動が発生してしまう。これに対して、回転子側に適切なダンパー巻線を入れることにより、図 8 (b) に示すようにトルクの過渡振動を抑えられることがわかった。



(a) ダンパー二次巻線なし



(b) ダンパー二次巻線あり

図 8 . ステップ状の風力変動に対する出力の過渡応答

FRT 特性

電力系統に連系されている風力発電装置を含めた分散電源は、系統側の一時的な電圧低下に対して定められた FRT 特性を満たすように規定されている。

図 9 は一般的な WPG に用いられている FRT 対応回路が示してある。系統の瞬時電圧低下が起きるとスイッチを OFF にして系統に直列に抵抗を投入する。系統電圧が回復したらスイッチをオンにしても元の状態に戻す。このような回路構成で、本研究で概念設計した 5MW 級 SIM-WPG で系統電圧が定格の 20% に 0.3s 間低下し、定格の 80% に回復した時の WPG の出力電

圧をシミュレーション計算した結果が図10である。このグラフからわかるように、瞬時電圧低下から回復した後1s以内に定格出力を回復している。これは、規定で要求されている特性を満たすものである。

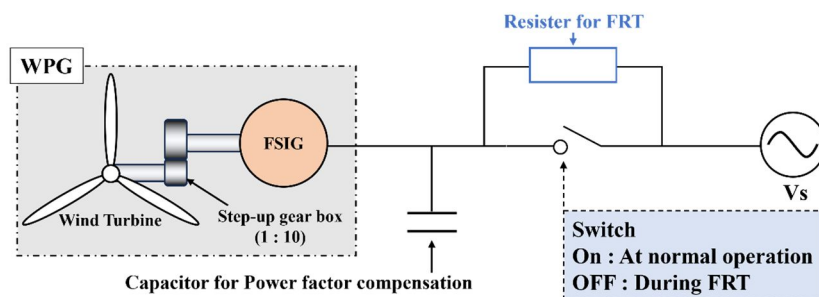


図9 . FRT 対応回路

研究成果のまとめ

本研究では誘導回転機の2次巻線をHTS線で構成したSIMの動作特性を実験及び数値シミュレーションによる解析を行なった。

本研究で明らかになったことを以下に要約する。

- SIMの構成に関して、鉄心を導入した構成にする必要があり、空芯構成では電機子巻線及び2次巻線との磁気的な結合が弱く、実用的な回転機を実現できない。ただし鉄心型であっても超伝導の特徴である高電流密度、低損失の巻線が実現できるため、誘導機の小型・軽量の特長はある。
- SIMを用いたFWUPSは、高価な半導体電力変換装置および同期を必要せず、電源ラインと負荷の間に挿入するだけでUPS機能が実現できることが、試作した小型SIMでの実験及び3MW級SIM-UPS装置についての数値シミュレーションにより示した。ただし、UPS動作に切り替える時にSIM出力電流の向きが変わるため端子電圧が降下する可能性があり、そのために負荷側にコンデンサやインダクタンスを挿入する必要がある。
- 5MW級のSIMを用いたWPGについて、概念設計を行った。その結果、SIMを電力系統に直接連系するためには1:10程度の増速機を入れる必要があり、また、回転子と固定子の鉄心は室温にして、HTS巻線のみをクライオスタットに入れる構造にする必要があることがわかった。また、数値シミュレーションにより風力変動が出力変動に及ぼす影響を解析した。その結果、風力の変動に対して減衰の悪い過渡振動が発生することがわかった。対策としてダンパー巻線を2次側に入れることが有効であることがわかった。さらに、FRT特性についてシミュレーション解析を行った。適切な抵抗及びコンデンサと切り替えスイッチを入れることに、系統連系に要求される特性を満たすことが可能であることが示された。

以上、本研究によりSIMを用いた大型USB装置、WPGに関してその実現可能性を示すことができた。

<引用文献>

H, H ウッドソン, J. R. メルツヒャー「電気力学I」大越, 二宮訳, pp. 101-139, 1970.

高橋, 他5人, 超伝導誘導機を用いたフライホイール式無停電電源装置の実験及び解析による検討, 電気学会全国大会, No. 5-153, 名古屋大学, 2023年3月17日.

S. Kuki, et al., Flywheel uninterruptible power supply using superconducting induction machine, 2022 Applied Superconductivity Conference, No. 4LPo1K-04, Hawaii, USA, October 27, 2022.

Y. Takahashi, et al., Studies on feasibility of wind-power generator using high temperature superconducting induction generator and its dynamic characteristics, 28th International Conference on Magnet Technology, No. 1PoA06-02, Aix-en-Provence, France, September 11, 2023.

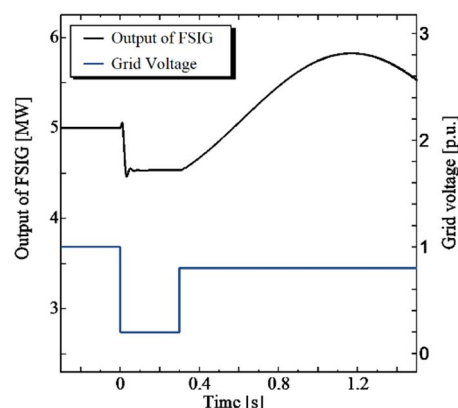


図10 . FRT 動作時のWPGの出力変化

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計0件

〔学会発表〕 計3件（うち招待講演 0件 / うち国際学会 2件）

1. 発表者名 S. Kuki, Y. Takahashi, S. Sonoda, K. Nakamura, T. Takao, O. Tsukamoto
2. 発表標題 Flywheel uninterruptible power supply using superconducting induction machine
3. 学会等名 2022 Applied Superconductivity Conference (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 高橋 佑輔、九鬼 翔太、園田 翔梧、高尾 智明、中村 一也、塚本 修巳
2. 発表標題 超電導誘導機を用いたフライホイール式無停電電源装置の実験及び解析による検討
3. 学会等名 電気学会全国大会
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 S. Kuki, S. Sonoda, K. Nakamura, T. Takao and O. Tsukamoto
2. 発表標題 Flywheel uninterruptible power supply using superconducting induction machine
3. 学会等名 27th International Conference on Magnet Technology (国際学会)
4. 発表年 2021年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

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
研究分担者	坂本 織江 (SAKAMOTO Oriie) (40443262)	上智大学・理工学部・准教授 (32621)	

6. 研究組織（つづき）

	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
研究分担者	福井 聡 (FUKUI Satoshi) (70293199)	新潟大学・自然科学系・教授 (13101)	

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