

令和 3 年 6 月 25 日現在

機関番号：37112

研究種目：基盤研究(C)（一般）

研究期間：2017～2020

課題番号：17K06326

研究課題名（和文）レアアースレスSRGとキャパシタレスAC-AC変換器による可変速風力発電システム

研究課題名（英文）Variable Speed Wind Power Generation System using Capacitor-less AC-AC converter and Rare-earth-less Switched Reluctance Generator

研究代表者

大山 和宏（OHYAMA, KAZUHIRO）

福岡工業大学・工学部・教授

研究者番号：60320321

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 3,800,000円

研究成果の概要（和文）：スイッチトリラクタンス発電機（SRG）による可変速風力発電システム（VSWPGS）に適用できるキャパシタレスAC-AC変換器（CLAAC）を提案した。CLAACは、各相コイルが独立しているSRGに適用できる点がマトリックスコンバータと異なる。CLAACによるSRGの励磁方法とトルク制御方法を提案し、風速変化に対して風車回転数を適切に制御できるVSWPGSの速度制御器を提案した。更にSRGとCLAACを用いるVSWPGSに対して、風車タービン、機械系、SRG、CLAAC、そして制御器の各数学モデルを導出して、それらに基づくシミュレータを構築し、自然風に近い風速変化を与えた場合の性能評価を行った。

研究成果の学術的意義や社会的意義

SRGとCLAACを用いるVSWPGS（提案方式）は、レアアースを使用しないので風力発電設備製造における環境負荷を下げ、更に風力発電設備コストを抑制できる。また大容量キャパシタを使用しないので、メンテナンスコストを抑えることができ、更にキャパシタ充電の必要がなく設備起動時間を短縮できるので、設備稼働率を改善できる。提案方式は、小容量の再生可能エネルギー発電設備を需要家の近くに配置する分散型電源への応用が可能であり、2050年カーボンニュートラルの実現に寄与することが期待される。

研究成果の概要（英文）：A Capacitor-Less AC-AC Converter (CLAAC) for a Variable Speed Wind Power Generation System (VSWPGS) using a Switched Reluctance Generator (SRG) has been proposed. As a new type of converter, the CLAAC was developed based on a matrix converter. The CLAAC can be applied to the SRG with independent coils. The CLAAC undertakes the role of controlling the power between the SRG and an electric system in the VSWPGS. Furthermore, a novel control algorithm for the CLAAC to regulate the rotational speed of the SRG has been proposed. The rotational speed controller based on the proposed control algorithm improves the power generation efficiency of the SRG for changes in wind velocity. The VSWPGS using CLAAC and the SRG is modeled with Matlab/Simulink. The modelling considers a mechanical model including a wind turbine, the SRG, the CLAAC, and a controller. Simulation results for wind velocity changes were shown to verify the performance of the proposed VSWPGS using the CLAAC and SRG.

研究分野：電気機器・パワーエレクトロニクス分野

キーワード：可変速風力発電システム キャパシタレスAC-AC変換器 スwitchトリラクタンス発電機 レアアースレス

科研費による研究は、研究者の自覚と責任において実施するものです。そのため、研究の実施や研究成果の公表等については、国の要請等に基づくものではなく、その研究成果に関する見解や責任は、研究者個人に帰属します。

様式 C - 19、F - 19 - 1、Z - 19 (共通)

1. 研究開始当初の背景

(1) CO₂ や NO_x の排出量増加による地球温暖化や大気汚染などの環境問題の解決が喫緊の課題になっていることから、風力・水力・地熱などの再生可能エネルギーの利用拡大が検討されている。中でも風力エネルギーは、海洋に囲まれている日本では洋上集合型風力発電所の導入が検討されていることから、今後更なる開発が期待されている。そのため風力発電設備の高性能化に寄与する技術開発が盛んに行われている。

(2) 風力エネルギーは風速の 3 乗に比例し、その風速は天候や地形の影響を受けて変化する。また風力タービン(WT)には風速に対してエネルギー変換効率が最大となる回転数が存在する。そのためエネルギー変換効率を高く維持するために、風力発電システムは可変速性能を有する必要がある。また発電コストを下げるために、設備費とメンテナンス費用を抑える必要があり、発電設備の構成要素の低価格化や高信頼化が望まれている。

(3) 実用化レベルでは、かご形誘導発電機(IG)や二重給電誘導発電機(DFIG)による可変速風力発電システム(VSWPGS)の導入が進んでいる。最近、発電効率向上と低騒音化を目的として、永久磁石同期発電機(PMSG)によるVSWPGSの実用化も検討されている。PMSGを発電機として用いる場合は、多極界磁により発電機の運転域を低速域に移動できるので、WTの運転域との調和を図るための増速機を省略することができ、増速機から発生するギヤ騒音を低減できる。またPMSGはIMのように励磁電流を必要としないので、IMと比較して発電効率が高い。しかしながら、大型のPMSGでは、永久磁石材料としてネオジウムやジスプロシウムなどのレアアースが大量に必要となるため、レアアースの価格変動のリスクを負っている。レアアースの調達国を分散するなどのリスク対策により、かつてのレアアース高騰の危機は脱したものの、電気自動車やハイブリッド車の普及に伴い、レアアースの需要増加が予想されており、レアアース高騰の再燃が懸念されている。

2. 研究の目的

(4) PMSGよりも低コストで、IGやDFIGよりも高効率かつ堅牢であるスイッチトリラクタンス発電機(SRG)のVSWPGSへの適用を検討する。SRGの固定子と回転子は、鉄心(コア)と巻線(コイル)のみで構成される簡単な構造であり、レアアースを用いないため低コストである。また界磁としてのコイルや永久磁石がないため、低慣性の回転子を設計することが可能なので、風速変化に応じるための可変速運転に向いており、風速変化の大きい日本の風況への適応力が期待できる。つまり短時間で細かく変化する自然風に対して出力を平滑化することを可能にしたり、風速変化に連動して変化する最大風車効率となる風車回転数に素早く追従する運転を可能にしたりするなどの特徴から、風力発電システム用発電機として期待されている。

(5) 一般にSRGによるVSWPGSでは、SRGと電力系統からの電力を受受する電力変換装置(AC-AC変換器)として、SRG側に非対称ハーフブリッジインバータを接続し、電力系統側にPWMコンバータを接続し、それらを繋ぐDCリンク部にはエネルギーバッファとして大容量キャパシタを用いている。大容量キャパシタを具備するが故に、カットイン時にキャパシタ充電が必要な上に、定期的なメンテナンスが必要となるため、発電コストが増加する。このような問題に対する改善策として、キャパシタを用いないキャパシタレスAC-AC変換器の開発が望まれている。AC-AC変換器からキャパシタを省略することができれば、AC-AC変換器の小型化、長寿命化、高効率化、高信頼化を達成できる。

(6) SRGによるVSWPGSへの適用を前提とするキャパシタレスAC-AC変換器(CLAAC)を提案する。提案するキャパシタレスAC-AC変換器は、マトリックスコンバータ(MC)をベースとしており、各相コイルが独立しているSRGに適用できる回路トポロジーを有する点がMCと異なる。またCLAACによるSRGの励磁方法とトルク制御方法を提案し、風速変化に対して風車回転数を適切に制御できるVSWPGSの速度制御器を提案する。更にSRGとCLAACを用いるVSWPGS(提案方式)の理論検証を実施するために、WT、WTを含む機械系、SRG、キャパシタレスAC-AC変換器、そしてコントローラの各数学モデルを構築し、Matlab/Simulinkにより風速を変化させた場合のシステム全体のシミュレーションを行う。

3. 研究の方法

(7) 図1で示すCLAACとSRGによるVSWPGSを提案する。提案方式は、WT、増速機、位置センサ付きSRG、CLAAC(双方向スイッチ18個)、コントローラで構成されている。SRGは、系統側(三相交流電源)の線間電圧により固定子コイルが直接励磁され、転流後に固定子コイルにて発生する誘起電圧により、系統側へ逆潮流する形で発電電力を供給する。一時的に系統側から電力を受け取るが、それ以上の電力を系統側に戻すことにより発電を行う。励磁区間の制御は、

回転軸端のロータリエンコーダ (RE) から引き込まれる A、B、Z 信号を用いてコントローラ内で演算される回転子位置 θ に基づいて正確に行われる。また θ の差分を取ることで得られる回転速度 ω_g をフィードバック量として、可変速風力発電システムにおいて必要な速度制御系を構築している。

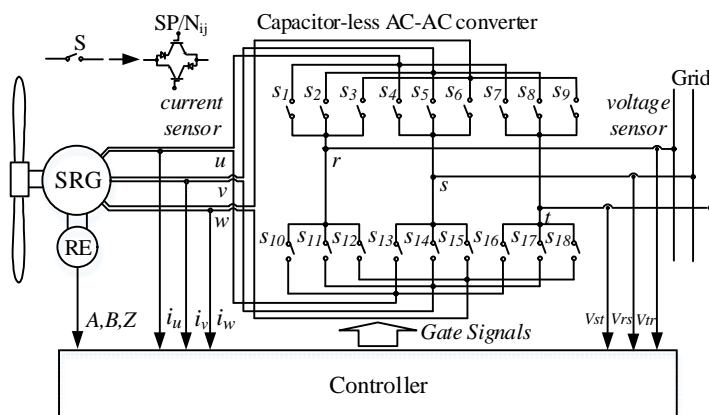


図1 CLAAC と SRG による VSWPGS

(8) 提案方式の理論検証を行うために、図1を構成する各要素の数学モデルを導出した。各数学モデルに基づき提案方式のシミュレータを Matlab/Simulink 上で構築した。SRG の数学モデルは、有限要素法静磁場解析で得られる静止トルクと磁束鎖交数の計算データをリマッピングすることで作成するテーブルデータと各相コイルの電圧方程式により構築した。機械系の数学モデルは、一般的な回転体の運動方程式に基づき構築した。WT の数学モデルは、翼素運動量理論に基づく計算データをリマッピングすることで作成するテーブルデータにより構築した。CLAAC は、Matlab/Simulink における Simscape を用いて構築した。

4. 研究成果

(9) 図2にVSWPGSの可変速制御性能を検証するためのシミュレーション結果を示す。同図(a)で示すように、風速 V_0 は 3.5[m/s] から 11.5[m/s] の範囲で、120 秒間で低風速から定格風速まで、途中で風速一定での運転を挟みつつランブ変化する場合を検討した。途中のランブ変化よりも早い過渡応答を評価するために、風速一定での運転中に振幅 0.5[m/s]・周波数 0.2[Hz] の正弦波を重畳している。同図(b)の T_w は、翼素運動量理論に基づく計算データを用いて構築する WT モデルから、刻々と変化する V_0 と風車回転角速度 ω_w の条件に合う値を読み出すことで得られる。同図(c)に WT 効率が最大となる SRG の回転角速度指令 ω_g^{ref} に対する回転角速度 ω_g の応答を示す。 ω_g^{ref} は、常に WT 効率が最大となる周速比 $x_{max} (=6.181)$ となるように算出するので、 V_0 と同じような変化となる。同図(c)より ω_g^{ref} と ω_g が良く一致していることから、WT 効率が最大値に維持できていることが分かる。また ω_g^{ref} と ω_g の偏差を入力とする速度 PI 制御器の出力 T_g^{ref} をルックアップテーブルに入力して θ_{on} と θ_{off} を読み出している。 θ_{on} と θ_{off} は、同図(d)、(e)で示すように、 V_0 つまり T_w の増加に連動して通電角が増加するように変化している。SRG の T_g は、同図(f)で示すように T_g^{ref} に良く追従している。ただし、 T_g は励磁周期ごとの平均値を示している。提案方式の速度制御系が VSWPGS に対して十分な可変速性能を有していることが分かる。

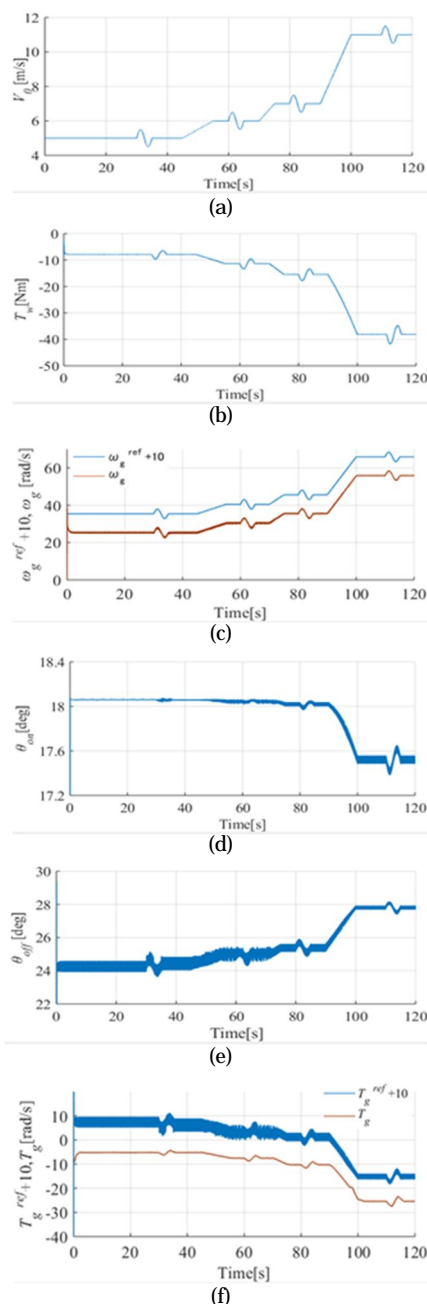


図2 シミュレーション結果

(10) シミュレーション結果より、提案方式において、キャパシタレス AC-AC 変換器が SRG を適切に励磁し、WT から得られる機械エネルギーを電気エネルギーに変換して系統側に逆潮流する系統連系インバータとして機能し、更に VSWPGS に必要な可変速制御性能も具備していることを明らかにした。

< 引用文献 >

吉 古元、大山 和宏、スイッチトリラクタンس発電機とキャパシタレス AC-AC 変換器による可変速風力発電システムのシミュレーション、電気学会論文誌 D、141 巻、2 号、2021、185-192

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計3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 Guyuan Ji and Kazuhiro Ohyama	4. 巻 23P11-7
2. 論文標題 Simulation of Wind Power Generation System Using Switched Reluctance Generator and Capacitor-less AC-AC converter	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 The 2018 International Power Electronics Conference	6. 最初と最後の頁 2921-2926
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 Guyuan Ji and Kazuhiro Ohyama	4. 巻 244
2. 論文標題 The application of an AC-AC converter to a wind power generation system with a switched reluctance generator	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 International Conference on Sustainable Energy and Green Technology	6. 最初と最後の頁 1-6
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 吉 古元、楊欣、大山 和宏	4. 巻 34
2. 論文標題 風力発電用スイッチトリラクタンス発電機のインダクタンス曲線と発電効率の関係に対する考察	5. 発行年 2017年
3. 雑誌名 福岡工業大学エレクトロニクス研究所所報	6. 最初と最後の頁 35-40
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 無
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4件（うち招待講演 0件 / うち国際学会 1件）

1. 発表者名 吉 古元、大山 和宏
2. 発表標題 キャパタレスAC-AC変換器を用いるSR発電機の発電特性への励磁方法の影響
3. 学会等名 2019年電気学会産業応用部門大会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Han Zhiwei、大山 和宏
2. 発表標題 有限要素法流体解析による風車ブレードの揚力抗力係数の算出
3. 学会等名 2019年電気学会産業応用部門大会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Han Zhiwei、大山 和宏
2. 発表標題 発電機の出力特性と調和する風車タービンの翼形的设计
3. 学会等名 電気学会マグネティックス/モータドライブ/リニアドライブ合同研究会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Guyuan Ji and Kazuhiro Ohyama
2. 発表標題 Simulation of Variable Speed Wind Power Generation System Using Switched Reluctance Generator and Capacitor-less AC-AC converter
3. 学会等名 7th International Symposium on Energy (国際学会)
4. 発表年 2017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

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
---------	---------