

科学研究費助成事業（科学研究費補助金）研究成果報告書

平成 24 年 5 月 22 日現在

機関番号：24403

研究種目：若手研究（B）

研究期間：2010～2011

課題番号：22760693

研究課題名（和文） 系統連系用風力タービンの複数台併結運転による出力変動低減

研究課題名（英文） Reduction in Power Output Fluctuations by Parallel Running of Multiple Wind Turbines Connected to Grid

研究代表者

涌井 徹也（WAKUI TETSUYA）

大阪府立大学・工学研究科・准教授

研究者番号：40339750

研究成果の概要（和文）：本研究では高い発電性能と出力変動低減効果を両立しうる系統連系用風力タービンの複数台併結運転システムを提案するために、その回転数制御方法の確立を目指した。平成 22 年度は、高風速下で併結運転を行った時に生じる風力タービンの出力制限方法の確立を行った。これを受けて平成 23 年度は、2 基から 10 基の風力タービンを併結した時のシステムの目標運転動作点（流入風速に対する併結回転数の決定方法）を明らかにし、その上で変動風況下での制御方法について検討を行った。

研究成果の概要（英文）：In this study, a control method of a parallel running system using multiple wind turbines connected to a grid was developed through a numerical simulation in order to archive a good balance between a high generating capability and a fine reduction in power output fluctuations. First, the regulation method of the maximum power output that occurs at high wind speeds was developed; then, the desired operating point of the parallel running systems, in which the number of the wind turbines ranges from 2 to 10, was analyzed. Moreover, on the basis of this analysis, the control method of the parallel running system was proposed.

交付決定額

（金額単位：円）

	直接経費	間接経費	合計
2010 年度	1,800,000 円	540,000 円	2,340,000 円
2011 年度	1,100,000 円	330,000 円	1,430,000 円
総計	2,900,000 円	870,000 円	3,770,000 円

研究分野：工学

科研費の分科・細目：総合工学・エネルギー学

キーワード：風力発電，系統連系，出力変動，動特性解析，シミュレーション

1. 研究開始当初の背景

化石燃料の使用による CO₂ 排出量の増加を低減するために、世界中でウィンドファーム（集合型風力発電設備）の建設が進んでいる。我が国でも 2010 年までに 300 万 kW の風力発電の導入を目指していたが、風速変動に伴い生じる出力変動が電力系統の電圧・周波数維持に影響を及ぼす可能性が指摘されている。そのため、我が国で風力発電設備を新設する際には、電力系統側の調整力が不足する時間帯の解列（電力系統からの切り離し）や、出

力平準化のための蓄電池の併設を義務付けることが少なくない。しかし、解列義務は設備容量が実質上抑制されて CO₂ 排出量の低減に寄与できず、蓄電池の併設は設置・運用コストを著しく増加させることから、我が国では風力発電の新規導入量が減少しているのが現状であった。

風力発電の導入量が多い欧州では、隣国同士で電力系統が接続しており、余剰・不足電力の融通が行えるため、出力変動低減のための研究は国外ではほとんど行われていなかった。

た。また、国内では出力変動が大きな問題になっているにも関わらず、蓄電池の併設による平準化以外には研究がほとんど行われていなかった。風力発電設備本体に関しては、可変速運転（風速変動に対して回転数を変化させて風力タービンの最大効率点での運転を行うとともに、出力変動をロータ慣性で吸収する）による出力変動低減効果の研究が申請者により行われていることを除けば、設置台数を増やすことで個々の設備の出力変動が相殺される可能性が議論されているにすぎなかった。

2. 研究の目的

これまでに研究代表者らは、可変速運転により出力変動の低減と発電性能の向上を両立できることを明らかにしている。また、体格の異なるシステムを対象に、ロータ慣性の増加による回転数の応答性低下についても分析を行っている。システムを大型化することで回転数の応答性が低下し、出力変動の低減効果の向上が期待できるが、我が国の道路インフラ事情等を考慮すると、定格出力 2MW（ロータ直径約 80m）程度が陸上に導入可能な上限容量と考えられる。そこで、システムの更なる大型化を行わずとも、ウィンドファームの高い発電性能を保持しながら出力変動を低減することを目的として、図 1 に示すような複数台風力タービンの併結運転システムを提案する。ウィンドファーム内の N 台の風力タービンの AC 発電出力を 1 台の大容量 PMW コンバータ/インバータを介して連系すると、いずれの風力タービンの回転数も印加周波数に拘束されて等しくなり、 N 倍の回転慣性モーメントを持った 1 台の超大型システムと力学的に等価と見なせる。印加周波数を適切に操作することで複数台の風力タービンの回転数を風速変動に応じて一括して変化させ、風力タービンの出力動力和が最大となる動作点での運転を実現しながら、増加した回転慣性モーメントを積極的に利用して出力変動を低減する。

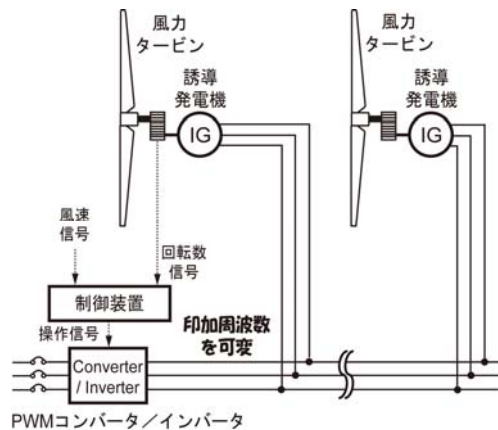


図 1 複数台併結運転システム

本研究では、併結運転システムの導入可能性を分析するための第 1 段階として、1) 高風速域での出力制限方法の確立、2) 複数台の風力タービンを併結した場合の運転動作点（最大出力動力点）の分析、3) 回転数制御方法の検討を、数値シミュレーションを通して行った。

3. 研究の方法

数値シミュレーションによる検討を行うに当たり、風力タービンの出力特性算出モデルと出力変動を含めたシステムの動特性シミュレーションモデルを構築した。

併結運転システムでは、風力タービン間で流入風速の差が大きくなると、各風力タービンの運転動作点がそれぞれの最大出力動力点から外れることになる。そこで、風力タービンの出力特性算出モデルには、最大出力動力点近傍でのみ推定精度が高い翼素・運動量複合理論ではなく、複雑な算出方法にはなるものの、幅広い運転動作点で高い推定精度を持つ局所循環法を適用した。

システムの動特性シミュレーションモデルは構成機器の定常入・出力特性、制御装置の制御演算アルゴリズム、およびロータの動特性を考慮すると、非線形連立微分代数方程式に帰着する。これにルンゲ・クッタ法とニュートン・ラフソン法を組み合わせることで、方程式を数値的に解いた。

4. 研究成果

(1) 高風速域での出力制限方法の確立

併結運転システムでは、風力タービンへの流入風速がそれぞれ異なった状態で可変速運転を行うため、発電機の定格出力を上回るような出力が得られる高風速が流入した場合には、風力タービン側で適切に出力を制限する必要がある。本研究では、翼のピッチ角を操作することで発電出力を一定値に保持する出力制御系（フィードバック制御）に着目し、制御パラメータ（調整値）は変更せずに設定値を変更することで発電出力の抑制を試みた。定格出力 2000 kW のシステム（ロータ直径：85m）の風速変化に対する回転数、発電出力の設定値からの偏差の時系列変化を図 2 に示す。定格出力よりも設定値を 5 通りに小さくしているが、制御パラメータを変更しなくても、ほぼ同様の出力変動特性が得られることがわかった。出力制御系の設定値を変更するとシステムの運転動作点は変化するが、システムの応答特性に大きな影響を及ぼす風力タービン側の回転コンダクタンス（回転数変化に対する発電出力の変化）がほとんど変化しないために、このような結果が得られることを確認した。

観測風況による年間シミュレーションより算出した出力変動評価指標と定格出力

2000 kW を基準とした設備利用率との関係を図 3 に示す. 定格出力を小さくすると可変速運転(発電出力が風速の 3 乗に比例して大きく変化)を行う風速範囲が狭くなること, さらには, 可変速運転を行う低風速の出現率が多いことも相俟って, 定格出力とともに中・長周期出力変動が小さくなる. しかし, 設備利用率も同時に低下するため, 出力変動と発電性能にはほぼ線形な相関(トレードオフ関係)があることを明らかにした.

(2) 併結運転システムの運転動作点の検討

風力タービンへの流入風速がそれぞれ異なった状態で併結運転システムでの発電出力が最大となる動作点を分析し, システムの目標運転動作点とする. 各風力タービンの回転数を同一としたうえで, 流入風速を種々に

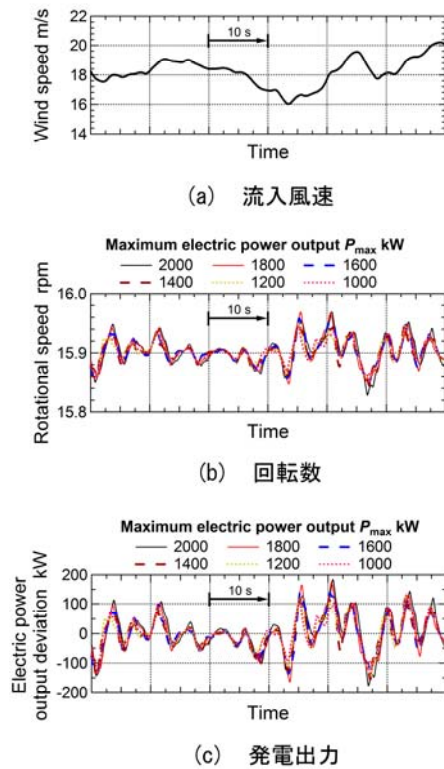


図 2 高風速域での運転挙動

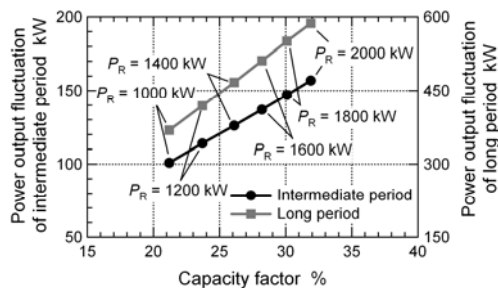


図 3 出力変動特性と発電性能の関係

変化させた場合に得られる最大出力動力点と流入風速の標準偏差の関係を図 4 に示す. 最大出力動力点は, システム全体のパワー係数(全風力タービンの出力動力和/全風力タービンの流入気流動力和)をトルク係数(全風力タービンの出力トルク和/全風力タービンの流入気流慣性トルク和)で除することで得られる周速比で表す. ここでは併結風力タービン台数を 3, 5, 10 台とした場合を取り上げているが, いずれの場合も流入風速の標準偏差(流入風速のばらつき)が大きくなるにつれて, 最大出力動力が得られる周速比が低下していくことがわかる. 本研究では図中に実線で示す近似式を同定し, 併結運転システムの目標運転動作点とする. 近似式による厳密な最大出力動力との差はわずかであることから, 各風力タービンの流入風速が既知であれば, 併結運転システムの目標運転動作点を容易に決定することができる.

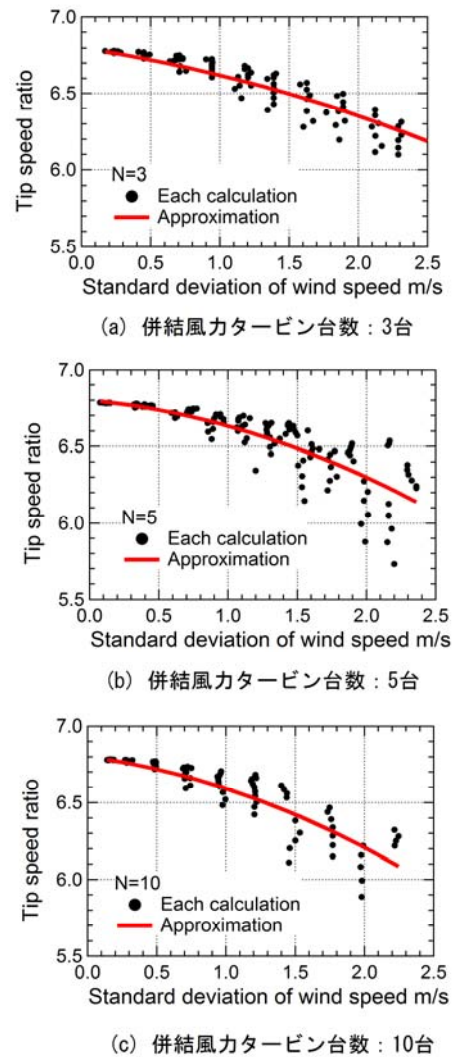


図 4 併結運転システムの運転動作点

(3) 回転数制御方法の検討

流入風速の変動に応じて変化する最大出力動力点に回転数を追従させるためには、システムの入力である流入風速に応じて風力タービンの負荷を操作する必要がある(「出力操作型」の制御)。併結運転システムでは、各風力タービンの負荷である誘導発電機のすべり周波数をインバータで操作することで負荷トルク操作を行う。流入風速に応じたシステム全体に加えるべき負荷トルクより、各風力タービンが担うべき分担負荷トルクを算出する。分担負荷トルクは、各風力タービンの回転数変化速度が機械的に併結された場合と等しいと見なすことにより算出することができる。インバータを用いた誘導発電機(1基)の可変速運転においては、すべり周波数制御を行うことで負荷操作が可能となるが、本併結運転システムでは、最も負荷トルクの大きな風力タービンにおいて、算出した分担負荷トルクを実現するように、該当風力タービンの回転数に基づきインバータ周波数を操作する。その他の風力タービンの誘導発電機はこのインバータ周波数で連系して運転を行うこととする。このような負荷操作法を採用するならば、全ての風力タービンの回転数が厳密には一致しないもの(すべりはごく微小であるためほぼ等しいと見なせる)、各風力タービンに対して良好な負荷操作が行いうることを数値シミュレーションを通して明らかにした。

(4) 得られた成果の位置付けとインパクト

風力タービンを流体機械と捉えた高性能化に関する研究、出力変動が電力系統に及ぼす影響に関する研究はこれまでも多岐に渡り行われている。しかし、本研究に見るように、風力発電システムを風力エネルギーから回転機械エネルギー、さらに電気エネルギーに変換するエネルギーシステムと捉えた場合の動的な挙動に関しては、それがシステムの常態であるにも関わらず、研究代表者らのこれまでの研究成果を除いては国内・国外でほとんど報告がない。よって、高い発電性能と出力変動低減効果を両立しうる複数台風力タービン併結運転システムを提案することは、極めて独創性に富んだ研究であるとともに、エネルギー学分野における風力発電のエネルギーシステムとしての学術的意義を高めるものと確信する。

(5) 今後の課題

風速変動に対する回転数の制御手法は確立できたため、次の課題として、風速変化に応じて併結した風力タービンを随時解列・連系する制御アルゴリズムの構築が必要となる。さらに、風力タービンを1台ずつ可変速運転した上で、その出力を連系するこれまで

のウィンドファーム運用との出力変動の比較を行う必要がある。

5. 主な発表論文等

[雑誌論文] (計2件)

- ① T. Wakui, R. Yokoyama, "Novel Control Strategy of Large Wind Turbines to Reduce Power Output Fluctuation and Pitch Angle Operated Frequency", Proceedings of the EWEA 2011 Conference, (2011), PO. 309, pp. 1-10, 査読有。
- ② T. Wakui, R. Yokoyama, "Power Output Fluctuation Analysis of Grid-Connected Wind Turbine-Generator System with Limiting Maximum Power Output", Proceedings of ASME 2011 the 5th International Conference on Energy Sustainability, (2011), Paper No. ES2011-54716, 9 pages, 査読有。

[学会発表] (計12件)

- ① 涌井徹也, 横山良平, 「出力平滑装置併設型風力発電システムの出力変動分析 (EDLCによる短周期変動抑制効果)」, 第33回風力エネルギー利用シンポジウム, 2011年11月30日, 東京。
- ② 涌井徹也, 横山良平, 「独立電源用風力タービンの性能低下に適応した風速センサレス可変速制御 (最大電力点追従制御とのシステム性能比較)」, 第33回風力エネルギー利用シンポジウム, 2011年11月30日, 東京。
- ③ 涌井徹也, 「風力発電システムの技術動向と今後の課題」, 大阪府工業協会新エネルギーシステム研究会, 2011年7月28日, 大阪。
- ④ 涌井徹也, 横山良平, 「定格出力抑制時の系統連系用風力発電システムの出力変動分析」, 第32回風力エネルギー利用シンポジウム, 2010年11月25日, 東京。

[その他]

- ① 研究成果データベース
<http://kyoindb.acs.osakafu-u.ac.jp/profile/ou t.gOjqHzf2hTerRTAwVAPPQ==.html>
- ② ホームページ
http://www.me.osakafu-u.ac.jp/esalab/Home/Japanese/Main/Frame_Japanese.html

6. 研究組織

(1) 研究代表者

涌井 徹也 (WAKUI TETSUYA)
大阪府立大学・工学研究科・准教授
研究者番号: 40339750