

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 28 年 6 月 6 日現在

機関番号：13101

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2013～2015

課題番号：25420246

研究課題名(和文) アルキメデスポンプを用いた揚水発電による大規模風力発電の電力安定化の研究

研究課題名(英文) Research on electric power stabilization of large scale wind power generation by using pumped storage power generation with Archimedean screw

研究代表者

菅原 晃 (SUGAWARA, AKIRA)

新潟大学・自然科学系・准教授

研究者番号：00270934

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 2,700,000円

研究成果の概要(和文)：本研究は、これまで間欠運転ができなかった揚水発電技術と風力発電を融合させ、時間的変動の激しいwindファーム出力を電力系統へ接続した際の電力安定化について、数値シミュレーションを行った。具体的には、アルキメデスポンプを用い海水揚水発電と1000MW級の大規模風力発電の組み合わせ、風速予測と実際の風況との差分を本システムが吸収し、周波数変動を許容範囲以内(±0.2Hz以内)に抑えた。統計モデル法を用い、出力不足を88MWから45MWへ約49%改善した。これにより風力発電を最大限系統連系させ、火力発電の運転割合を圧縮しCO2排出を1.15～1.87[百万t/年]削減する可能性を示した。

研究成果の概要(英文)：In this study, electricity stabilization of connecting the intense windfarm output to a power system by fusing between wind and pumped power generation which cannot work intermittent driving until now is simulated numerically. Specifically, a seawater pumped storage power station with Archimedean screw and large scale wind power station of 1000MW are combined, and frequency change can be controlled within tolerance level (less than plus-minus 0.2Hz) by absorbing difference between wind velocity prediction and actual wind. It is clarified that lack of system output is improved from 88MW to 45MW, approximately 49%, by using the statistical model method. This system can reduce CO2 emission of 1.15 - 1.87 [million ton/ year] in the electric power generation system in Japan, because it can connect a maximum electricity from wind power generation system to the power system and compress a driving ratio of thermal power generation.

研究分野：工学

キーワード：風力発電 揚水発電 アルキメデスポンプ 間欠運転 電力安定化 二酸化炭素排出削減

1. 研究開始当初の背景

風力発電は、系統連系する場合、電圧および周波数の安定化を考慮する必要がある。ヨーロッパやアメリカ合衆国のように電力系統が縦横に太く繋がっている場合は、系統容量を最大限統合した電力系統規模を構成することができ、風力・太陽光などの変動の激しい再生可能エネルギーを大量に導入することができる。逆に、我が国のように電力各社間の系統接続容量が少ない状況では、これらの導入規模は極めて少なく制限される。そのため、電力貯蔵装置と組み合わせる必要がある。大規模風力発電の導入が遅れている。

大規模風力発電と組み合わせる実用規模のエネルギー貯蔵装置として、揚水発電システムが主流でギリシャおよびその孤島、トルコ等多くの研究例がある。この他に NAS 電池や圧縮空気などが挙げられるが中規模に区分される。Kim 氏ら(Y. M. Kim et al. Energy, 36 (2011) pp.6220-6233)は新しい定圧型圧縮空気と揚水の組み合わせについて検討し、発電開始までの起動時間の短縮が提案された。

Yang 氏ら(C. Yang, et al. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 15 (2011) pp.839-844)は、アメリカ合衆国での実用規模の電力貯蔵装置として、揚水発電の問題点を指摘している。経済的な面の他に、採石場や鉱山を利用する場合の水質汚濁が想定された。この点について、沖縄やんばる海水揚水発電所では、ゴム製シートにより貯水池と地面が隔離されており、環境への影響は少ない構造である。

一方で、経済性を考慮した研究もおこなわれている。Delarue 氏ら(E. D. Delarue, et al. Energy Conversion and Management, 50 (2009) pp.1450-1456)は、風力発電によるCO₂ 排出量削減効果を考慮したモデルを提案した。また、Reutera 氏ら(W. H. Reuter, et al. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 16(2012)pp.2242-2248)は、市場プレミアム方式を採用するドイツの制度をもとに風力揚水発電システムへの投資について検討し、経済的評価モデルを示した。

これまでの研究によると、1000MW 級ウィンドファームの電力調整を目的として考えられる大規模なエネルギー貯蔵装置は揚水発電になるが、現状の揚水発電は、間欠運転が出来ないため、風力発電と組み合わせることが出来ない技術である。

本研究では、これを実現可能にする技術として、図1のアルキメデスポンプを用いた海水揚水発電を提案する。大規模洋上ウィンドファームは電力系統と接続され、天気予報による予測風速をもとにウィンドファームの予測出力を設定する。これに合わせ、電力系統では火力発電等の出力調整を行う。実際の風速によりウィンドファームの予測出力が、設定を下回った場合は貯水池からの水力発電を行い、上回った場合はアルキメデスポン

プによる揚水を行う。揚水と水力発電は独立した2本の導管を使うため、頻度の高い間欠運転が可能であり、風力発電のような時間的変動が激しい電力に対する調整能力を有するシステムである。

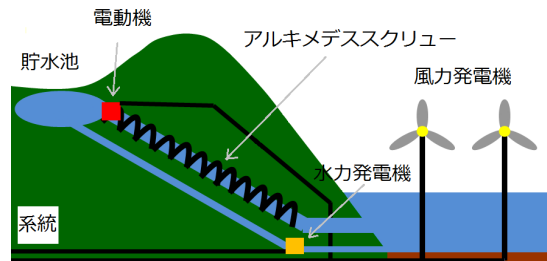


図1 アルキメデスポンプを用いた揚水発電システムの概略図

2. 研究の目的

本研究の目的は、大規模風力発電を最大限電力系統に連系させ、アルキメデスポンプの揚水と水力発電のシステムで自然エネルギーによる発電電力の変動分を吸収し電力安定化を行うことである。

アルキメデスポンプは、長軸の回転に対する螺旋構造で、慣性モーメントが小さく、水の汲み上げ効率は約70%と高い。強いブレーキは必要とせず、運転と停止が短時間で行え間欠運転が可能であり、停止時の水の位置エネルギーは保持される。すなわち、アルキメデスポンプを用いることで、揚水発電と大規模風力発電の組み合わせを可能にする。

我が国の系統電力の質的要求は高く、電圧では101V±6Vの範囲に、周波数変動は殆どの電力会社で±0.2Hz以内に設定しなければならない。自然エネルギーは時間的に不安定であり、大規模な太陽光・風力などの変動の大きな電力は、その導入容量が系統容量に依存するため、系統連系が制限されている。また、半導体産業などでは、系統電圧・周波数の変動が製品の質を低下させるなど、我が国の基幹産業との共存が懸念されている。

風力発電が系統へ与える電圧・周波数変動抑制法として、風力発電機の一部停止・制動運転やNAS電池等の貯蔵装置が備えられるが、設備容量の規模、採算性、安全性など課題が多い。これに対し、本システムは、風力発電で得られたエネルギーを最大限有効活用できる。すなわち、風力発電で得られた電力をほぼ全量系統に供給でき、余剰分はアルキメデスポンプにより揚水し、不足分は貯水池からの水力発電で補てんするため、風力発電の変動分のみを本システムが吸収するだけの設備容量をもてばよく、コンパクト化が可能である。本システムの特徴は、1000MW級の大容量ウィンドファームを最大限利用し適正な制御が可能であること、50年程度の長寿命であること、システム廃棄時に発生する廃棄物は通常建造物に由来するため環境安全性が高いこと、廃棄物の殆どがリサイクル

ル可能なことが挙げられる。我が国の自然エネルギー大量導入には、有効なシステムであると考えられる。

揚水のポンプとして、アルキメデスポンプを選択した理由は、

- ・揚水と発電を独立させることで、それぞれの機能において高効率な運転がきること。
- ・風力の急激な変化は、アルキメデスポンプの回転エネルギーに変換でき、応答特性が良く、間欠運転が可能であること。
- ・貯水池の水量に応じた計画発電中に、同時に風力エネルギーの急激な変化を貯蔵エネルギーに変換できること。
- ・風力停止で回転停止の際、水の位置エネルギーは保持され、強いブレーキを必要としないこと。

などの優位性が挙げられるからである。本研究以外に小型ポンプによる揚水発電の研究例はあったが、本研究と異なり電力停止の際に逆流する、バルブ制御時に下流部の水圧が上流部を上回るまでロスが生じる、ばっ気装置が必要など、間欠運転には不向きであった。アルキメデスポンプの欠点は、揚水用にこの設備を付加する必要性があり追加コストがかかることである。しかし、このことは、大容量風力発電と対にして採算性を考えればスケールメリットにより十分に許容可能な範囲であると考えられる。

3. 研究の方法

本研究では、1000MW 級の大規模風力発電において、天気予報の風速データを元にした総合的な計画発電を考え、風車およびアルキメデスポンプの慣性モーメント、ウインドファームにおける風車の配置、水力発電の起動時間を取り入れた数値シミュレーションから、電力システムの容量に対する周波数変動特性を解析する。また、これまでに収集した天気予報による3時間ごとの風速予測データから火力発電出力を設定し、気象台による実測データから10分ごとの系統電力化不足分を算出し、本システムによる電力安定化法を評価する。

さらに、本安定化法による火力発電の運転割合圧縮によるCO2削減量を算出する。揚水発電の規模は、沖縄やんばる海水揚水発電（直径250m、深さ25m、発電機出力30MW）をモデルとする。洋上風力が可能で、海岸近くに500m級の山（有効落差200mと仮定）がある江差（北海道）と新潟市の風況を用い数値計算を行う。

最後に、採算性について評価する。アルキメデスのポンプを用いることで、揚水と発電を独立運転させ高効率化し、計画発電により系統電力需給の平滑化を行うとともに風況の急激な変化を吸収できることで品質の良い電力への変換を行う。また、通常の夜間電力による揚水発電を行うことで、設備利用率を上昇させる。貯水池の寿命は50年程度を想定し、火力発電所の新規建設や運転割合を

圧縮することでCO2削減効果がある。これら具体的実用性を考慮し、採算面も併せて評価を行う。

4. 研究成果

(1) アルキメデスポンプ模擬実験装置の特性測定

図2に製作した全長約2m、直径0.3mのアルキメデスポンプ実験装置を、表1に測定結果の一例を示す。実験パラメータを変えて角度に対する水の汲み上げ量、位置エネルギー、電力などの特性測定を行い、これらから角度に対するエネルギー変換効率を求めた。傾斜角を23°から38°まで変化させ、汲み上げ高さ0.78mから1.23mまで変えて、回転数30~75[rpm]で、定常状態での瞬間的な汲み上げ水量[kg]と消費電力[W]を求めエネルギー変換効率を算出した。

本研究で製作したアルキメデスポンプ模擬実験装置において、摩擦等によるロスを考慮した空転時の消費電力を差し引いた値として、最大エネルギー変換効率約42%を得た。溶接部分とアクリルパイプとの接合部分からの漏れによる逆流を防ぎ、モーターの運転時の回転数を最高効率で行うことができれば、効率が向上すると思われる。

本測定結果から、数値シミュレーションに用いる仰角30°での動作が可能で、回転数制御等が妥当であることが示された。

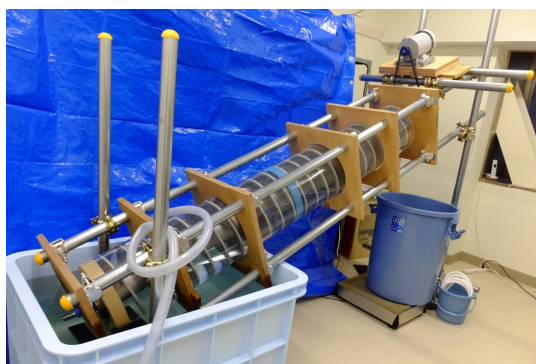


図2 アルキメデスポンプ模擬実験装置

表1 模擬実験装置測定例

全長	2.0 [m]
汲み上げ高さ	0.93 [m]
スクリー直径	0.3 [m]
スクリーサイクル数	25[cycle]
傾斜角	28 [deg]
汲み上げ水量(30rpm)	1.2[kg/s]
汲み上げ水量(60rpm)	2.8[kg/s]

(2) シミュレーション条件の設定

条件設定の一例について説明する。図3に1000MW ウインドファームモデルを示す。1基

2MWの風力発電機20×25基を格子状に配置する。簡単化のために、風の伝播速度を10m/sと仮定し、A列での瞬時発電電力が50秒後にB列で得られるものとし、横25基分を積算することで瞬時ウインドファーム出力を算出する。水力発電機は、停止状態から定格運転まで350秒を要するものとする。

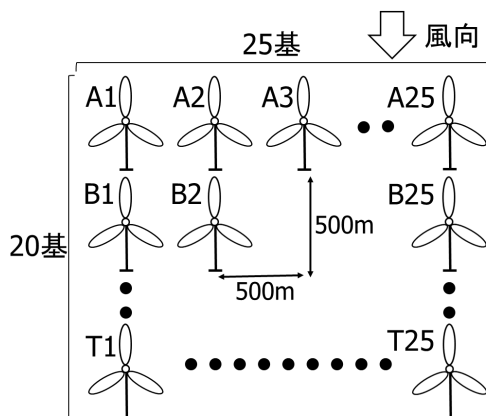


図3 仮想ウインドファームの配置図

(3) 数値シミュレーション

2MW 風力発電機の出力データや、学内で観測した風向風速データの高度補正・洋上補正したデータを用い数値シミュレーションを行った。なお、本シミュレーションにおいては、予測ウインドファーム出力を大幅に超える場合は出力抑制や解列などで対応することとし、出力不足の場合について重点的に検証を行うこととした。

風上検知法

2MW 風力発電機の出力データを用い、1000MWの仮想ウインドファームを構成した。図3のA列からF列までの6台で今後予想されるウインドファーム出力が、予定した出力予測を下回る場合に水力発電を起動する方法を風上検知法とする。

風上検知法でのシミュレーション結果を図4に示す。殆どの時間帯において、設定したウインドファーム出力予測値455MW運転が可能であることがわかる。しかし、図4中～の時間帯に水力発電機の始動時間遅れによる電力不足が生じた。

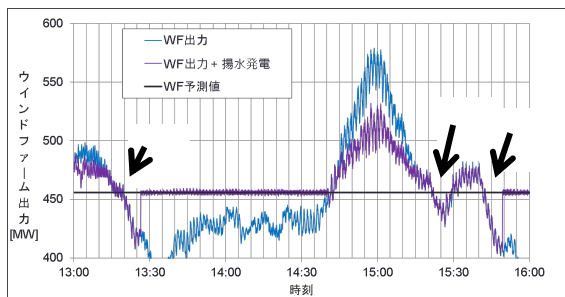


図4 風上検知法によるシステム出力

統計モデル法

図3中のA列の風力発電機1基の瞬時電力から仮想ウインドファームの瞬時出力を求め、現在の時刻に対する過去の相関の強さを示す相関係数を算出した。相関係数は-1から1までの値を取り、負の値となる負の相関ではウインドファーム出力が下がることを意味し、今後の出力も下がることと推定される。計算結果の一例を図5に示す。ウインドファーム出力に対し、0.001Hz以上の微小変動分をフィルタリング除去し、相関係数を求めた。ここで、相関係数の算出間隔は1s、過去の観測データ数nは60とした。最小二乗法を用い、ウインドファーム出力が設定した予測出力を下回る時刻を推定し、その時刻から350[sec]前の時刻に水力発電機を始動させることで、水力発電機の動作遅れを補償する統計モデル法を提案した。統計モデル法を適用したシミュレーションの結果の一例を図6に示す。水力発電機の始動遅れ時間を改善することに成功した。これにより本風力-揚水発電システムによって電力を安定化できることを確認した。また、風上検知法で電力不足が生じた図4～の時間帯について、図6～のように、それぞれ100, 100, 49%改善できた。

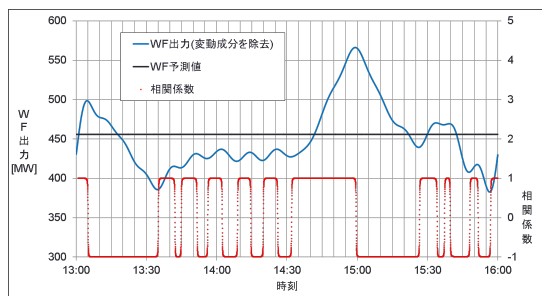


図5 平滑化したウインドファーム出力と相関係数

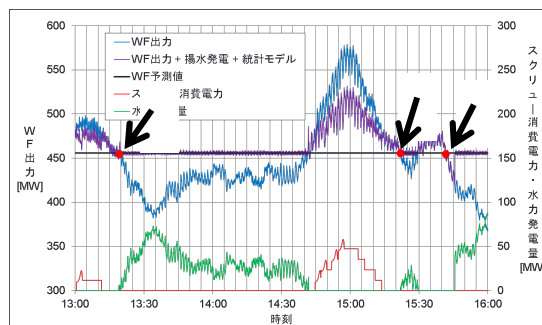


図6 統計モデルを適用したシミュレーション結果

周波数変動

電力系統において、瞬時総電力容量に対し需要と供給のバランスがずれると系統周波数が増減する。一例として、東北電力管内では±0.2[Hz]以内と設定している。

周波数変動値 f の計算式は、次式で表される。

$$\Delta f = \frac{\Delta P / P \times 100}{K_G + K_L} \quad [\text{Hz}]$$

ただし、

P : 電力変動[MW]

P : 総発電出力[MW] (=6440[MW])

K_G : 電源の周波数特性[%MW/Hz] (=7~14)

K_L : 負荷の周波数特性[%MW/Hz] (=3~4)

周波数変動は、系統容量を6,440MWとすると、図4のときの-0.137Hzから図6の-0.070Hzに改善できた。

C02削減量

本システムを日本各地に設置することを想定する。風速出現率が平均風速から与えられるレイリー分布に従うものと仮定し、各地の平均風速を適用する。新潟および江差の平均風速は、それぞれ3.3, 4.6m/sであり、高さ補正・洋上補正を行い本システムに適用する。年間発電電力量は、それぞれ 1.66×10^9 , 2.71×10^9 kWhとなる。これらすべてが火力発電による電気の使用量削減になるとし、C02削減効果を示すマージナル係数を0.69kg-C02/kWhとすると、それぞれ 1.15×10^6 , 1.87×10^6 [t/年]の削減量に相当する。ここで、本システムで想定するウインドファームと海水揚水発電所は、必ずしも隣接する必要がないため、ウインドファームは風況の良い地点を選べば良い。ただし、これらの間の距離に応じた詳細なシステムモデルを考慮する必要が生じ今後の研究課題である。

採算性評価

採算性算出方法を以下に示す。発電コストは、次式で表される。

$$\text{発電コスト} = \frac{C_w / L_w + C_a / L_a + C_o / L_o + \text{運転維持費}}{\text{年間総発電量}}$$

ここで、

C_w : 風力発電設備コスト

C_a : アルキメデススクリューコスト

C_o : 揚水発電設備コスト

L_w : 風力発電設備耐用年数

L_a : アルキメデススクリュー耐用年数

L_o : その他耐用年数

運転維持費 : 総費用×2%

年間総発電量と発電コストの算出条件を表2,表3に示す。結果として、表4の発電コストが得られた。

表2 年間総発電量の算出結果

新潟	北海道(江差)
1.66×10^9 [kWh]	2.71×10^9 [kWh]

表3 発電コストの算出条件

	単価	設備容量	耐用年数
風力発電	2.3 [億円/MW]	1000 [MW]	17年
アルキメデススクリュー	50 [億円/台]	3 [台]	20年
揚水発電	10 [億円/MW]	90 [MW]	50年

表4 発電コストの算出結果

新潟	北海道(江差)
14.08 [円/kWh]	8.63 [円/kWh]

(4) 位置づけとインパクト・今後の展望

本研究は、これまで間欠運転ができなかった揚水発電技術と風力発電を融合させ、時間的変動の激しい自然エネルギーによる発電が電力系統に与える周波数変動を許容範囲以内に抑えること、および火力発電の運転割合を圧縮し我が国の発電システムにおけるC02排出を削減することが目的である。具体的には、アルキメデスポンプを用いることで、海水揚水発電と1000MW級の大規模風力発電の組み合わせを可能にし、風速予測と実際の風況との差分を本システムが吸収することにより、火力発電の稼働率を低減させ、結果として最大限C02排出量を削減することを提案した。

統計モデル法を用いることで、風上検知法では解消できなかった緩やかな電力変動によるシステム出力不足を88MWから45MWへ約49%改善できることを明らかにすることができた。

今後、本研究で提案した統計モデル法を使用し、風力発電だけでなく大規模メガソーラも含めて、風力発電の出力予測モデルを構築し予測精度の評価・検討を行う。これらを踏まえ、特色のある研究へ発展させることを考えている。

本研究は、我が国の地理的条件、現在において実現可能な技術であり、使用するほとんど全ての建造物はリサイクル可能である。我が国だけでなく全世界においても、持続可能な社会を構築する基礎資料になるものと期待する。

最後に、本研究を遂行するに当たり、好意

により風力発電機の出力行データと新潟県企業局により水力発電機のデータの提供を受けたもので、感謝申し上げます。

5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文](計1件)

Hiroya Mitsuyose, Daichi Mizuse, Hiroatsu Fujiwara and Akira Sugawara:" Power stabilization by windfarm applied statistical model and pumped storage generation using Archimedean screw", Journal of Mechanics Engineering and Automation, Vol. 5, No. 12, 2015, pp. 681-686.
DOI:10.17265/2159-5275

[学会発表](計5件)

藤原裕充, 菅原 晃, 水瀬大地, 三ツ寄裕也, 山栗健嗣:「揚水発電によるウインドファーム出力の安定化」, 平成 28 年電気学会全国大会 7-076, 2016 年 3 月 18 日, 東北大学川内北キャンパス(宮城県仙台市).

水瀬 大地, 藤原 裕充, 三ツ寄 裕也, 菅原 晃:「複数の判定法を用いた風力発電システムの安定化」, 平成 27 年度(第 25 回)電気学会東京支部新潟支所研究発表会, NGT-15-026, 2015 年 10 月 31 日, 長岡技術科学大学(新潟県長岡市).

Hiroya Mitsuyose, Daichi Mizuse, Hiroatsu Fujiwara and Akira Sugawara:" Power stabilization by windfarm applied statistical model and pumped storage generation using Archimedean screw", The International Conference on Electrical Engineering (ICEE) 2015, ICEE15A-297 (July 7, 2015, Hong Kong, China)

上原聡一郎, 菅原 晃:「アルキメデススクリューを用いた揚水発電による風力発電の電力安定化」, 第 35 回風力エネルギー利用シンポジウム, A51, pp.276-279, 2013 年 11 月 13 日, 科学技術館(東京都千代田区).

Yazhou Zhai, Jinghao Ma, Masaki Mitobe, Souichiro Uehara, Shaoyan Gon, and Akira Sugawara:" A new strategy of using unstable offshore wind power by combination with pumped storage generation with reversible pump turbine", Clean Technology 2013, Renewable Energy Technologies, 918(May 13, 2013, Washington DC, USA)

[その他]

菅原 晃:「新潟大学・電気基礎研究室の研究紹介」, 風力エネルギー学会論文集(寄稿), 第 37 巻, 第 4 号, pp.548-551(平成 26 年 2 月)

6. 研究組織

(1) 研究代表者

菅原 晃 (SUGAWARA AKIRA)

新潟大学・自然科学系・准教授

研究者番号: 00270934