

平成 30 年 5 月 21 日現在

機関番号：10101

研究種目：基盤研究(B) (一般)

研究期間：2015～2017

課題番号：15H03954

研究課題名(和文) 再生可能エネルギー出力変動抑制のためのHP/CGS併用熱供給システム

研究課題名(英文) HP/CGS System for Mitigating Variable Power Outputs of Renewable Energy System

研究代表者

北 裕幸 (Kita, Hiroyuki)

北海道大学・情報科学研究科・教授

研究者番号：30214779

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 12,200,000円

研究成果の概要(和文)：再生可能エネルギー(RE)の出力変動を抑制するために、高価な蓄電池を用いない新しい技術を開発することが望まれている。本研究では、熱供給を行っている既存のコージェネレーションシステム(CGS)にヒートポンプ(HP)を併設することで、蓄電池と同様に電力系統との間で電気の吸収/発生を行うことが可能な世界で初めての技術を開発した。特に、CGSとHPの実際の応答特性を考慮し、熱供給システム特有の制約の下で、どの程度の出力変動に対応できるかを明らかにした。また、電力系統内に多数分散して存在するCGS/HPを束ねて全体としてRE電源の変動抑制に貢献させるための枠組みを明らかにした。

研究成果の概要(英文)：Variable renewable energy generations (RE) are being integrated into power systems in the world due to their environmental advantages. On the other hand, massive integration of RE would enlarge system frequency excursion due to variable and intermittent nature of RE outputs. For the supply and demand balancing control in a whole power system, introduction and application of energy storage systems (ESS) attracts great attention in the world. Usage of ESS is technically feasible, but is still difficult from economical viewpoint, due to their expensive installation cost and round-trip conversion losses. Therefore, as an alternative solution for fluctuation in generation output from renewables, the authors propose combined heat-pump and co-generation system such as gas-engine generator system, fuel cell system (CHBS). Major distinguishing idea of CHBS is to hybridize two heat supply devices, heat pump (HP) and CGS. Adequate control of HP and BG enables the apparent energy storage function.

研究分野：電力系統工学

キーワード：電力系統工学 再生可能エネルギー 風力発電 太陽光発電 コージェネレーション ヒートポンプ

### 1. 研究開始当初の背景

再生可能エネルギー(以下 RE)電源,特に太陽光発電や風力発電は,出力を自在に制御できないだけでなく,自然現象に左右される間欠的な出力変動特性を持っており,導入量が拡大すると電力系統の安定運用に多大な影響を及ぼすことが懸念されている.このため,主に蓄電池を用いて RE 電源の出力変動を抑制する研究が行われてきている.ところで,エリア内の気象状況が,比較的ゆっくりではあるが一斉に変化することで,RE 電源群の合成出力が大きく変動する現象(ランプ変動)が発生し得ることが指摘されている.この場合,変動抑制に必要な蓄電池容量は非常に大きなものとなる可能性がある.そこで,特にランプ変動を抑制することに特化するならば,高速な制御性は必要ないことから,高価な蓄電池ではなく,むしろより安価な制御システムで対応する方が得策と言える.

### 2. 研究の目的

本研究では,ガスエンジン,燃料電池など,熱供給を行っている既存のコージェネレーションシステム(CGS)にヒートポンプ(HP)を併設することで,熱供給量を一定に維持したまま,蓄電池と同様に電力系統との間で電気の吸収/発生を行うことが可能な世界で初めての技術を開発する.特に,CGSとHPの実際の応答特性を考慮し,熱系,ガス系,水素系,など熱供給システム特有の制約の下で,どの程度の出力変動に対応できるかを明らかにする.また,電力系統内に多数分散して存在する CGS や HP を束ねて,全体として RE 電源の変動抑制に貢献させるための枠組みを提唱すると共に,その経済性や RE 電源の導入量の拡大について評価する.

### 3. 研究の方法

本研究では,電力系統の安定運用に責任を持つ送配電事業者(上位層),多数分散して存在する CGS や HP を統括するアグリゲータ(中位層),CGS や HP の所有者(下位層)からなる3階層の経済主体を想定し,それらが相互に協調しながら RE 電源出力のランプ変動を抑制するための制御・運用手法を開発する.下位層においては,熱需要を満たしながらアグリゲータから与えられる制御目標値に自律的に追従するよう,HP と CGS の熱供給比率を制御する手法を開発する.中位層においては,送配電事業者から要求される制御量を,多数の HP と CGS に最適に配分するための手法を開発する.上位層においては,予測された RE 電源のランプ変動を抑制するために必要な制御量を算定し,それを,電力系統の調整用発電機と CGS/HP のアグリゲータに最適に配分する手法を開発する.開発した手法を実際のランプ変動データに適用し,経済性や RE 電源の導入拡大等の面からその有効性を評価する.

### 4. 研究成果

#### 4.1 HP/CGS システムの制御手法の開発

(1) HP, CGS の応答特性のモデリング  
酪農学園大学に設置されている NEDO 実証設備の HP および CGS の運転特性を測定し,起動停止および出力調整に関する時間応答特性のモデリングを行った. HP については,起動指令から定格消費電力に到達するまでの起動時間はおよそ 360 秒であった.一方で,停止時間はおよそ 11 秒と,起動時間に比べて非常に短いことが明らかとなった.一方,CGS については,指令値の変更からある遅れ時間経過後,更新された指令値に向けて一定の変化率で出力が変化する挙動が観察された.また,指令値が更新されても 10 秒ほどそれまでの出力変化を継続した後,一定期間の出力変化の停止を経て,新たな指令値に向けて一定の変化率で変化する挙動が観測された.

#### (2) 開発した出力変動抑制制御手法

WF の出力予測データに基づいて HP と CGS の運用計画を最適化により決定する「運用計画策定」と,予測誤差への対応としてオンラインで観測される WF 実出力に基づいて運用計画を修正する「リアルタイム制御」の2ステップで構成される手法を開発した.手法の有効性を検証するため,東北地方に設置されている WF 群の合計出力の実績ならびに予測データを用いて,提案手法の変動抑制効果を評価した.比較対象として提案システムを用いず元々の WF 出力に対して評価した場合,ならびに応答遅れのない理想的な HP および CGS モデルを用いた場合についてもシミュレーションした.ほぼすべての日で,提案手法を用いることで WF 出力のみよりも要件逸脱率が低減できることがわかった.一方で,理想的な HP/CGS システムと比較した場合,応答速度等の理由により要件逸脱率は悪化することが明らかとなった.

また,本手法を応用することで,30 分間の発電電力量を予め通告した値に一致させる計画運転についても具体的なアルゴリズムの開発を行い,本研究の HP/CGS を蓄電池のように制御することで計画運転が可能であることも明らかにした.

#### 4.2 複数サイトにおける HP/CGS の統合制御手法

複数サイトを含む場合,4.1における「運用計画策定」を,各サイトに設置されている HP や CGS の起動停止状態を含めて厳密にモデル化した一つの最適化問題として定式化すると,非常に規模の大きな組み合わせ最適化問題となり,現実的な時間で解を求めることは実現性に欠く.そこで,各種制約条件を緩和した最適化問題として近似的に最適な運用計画を求める手法を開発した.提案手法の有効性を検証するため,ある1日の WF 出力予測に対して,提案手法を適用したシミュレーションを実行した.WF 出力予測の変

動を打ち消すように複数提案システムが運用計画を作成できることが明らかとなった。また、合成出力の変動幅は制御目標内に抑えることができた。

#### 4.3 制御コストの評価

CGS としてガスエンジンおよび燃料電池を想定し、RE 電源の出力変動抑制のためにあらかじめ調整力を確保しておくことで発生するコストを評価する手法を開発した。開発手法は、調整力を確保するために CGS の運転範囲や蓄熱槽の蓄熱可能範囲を本来よりも狭めた上で、コストが最小となるような CGS の最適運用を算定する。得られたコストを、上記の制約を課さない場合のコストと比較することで追加コストを算定することができる。シミュレーションの結果、ガスエンジン CGS の調達コストは、およそ 3~9[円/kW・h]、燃料電池 CGS はおよそ 3~6[円/kW・h]となり、調整用電源として一般的に用いられる火力発電所のコストに比べかなり低コストであることがわかった。

#### 5. 主な発表論文等

[雑誌論文](計2件)

原亮一, 北裕幸, 石川志保, 平瀬貴之: 「HP/BG 併用熱供給システムを用いた風力発電の計画発電手法」, 電気学会論文誌 B 分冊, 査読有, 138 巻, 6 号, 2018 (掲載決定)

濱本篤志, 原亮一, 北裕幸: 「HP/BG 併用熱供給システムによる風力発電出力変動抑制の検討」, 電気学会論文誌 B 分冊, 査読有, 137 巻, 6 号, pp.446-452, 2017

[学会発表](計34件)

中村勇太, 原亮一, 北裕幸, 横川 誠, 武田清賢: 「需給調整力提供を目的とした複数コージェネレーションシステムの運用計画に関する検討」, 平成 30 年電気学会全国大会, 福岡, 6-134 (2018)

秋岡竜太, 原亮一, 北裕幸, 石川志保: 「HP/BG 併用熱供給システムによる風力発電出力ランプ変動抑制の検討-設備容量増設による変動抑制能力への影響-」, 平成 30 年電気学会全国大会, 福岡, 6-288 (2018)

横山凌, 原亮一, 北裕幸, 石川志保: 「HP/BG 併用熱供給システムによる風力発電出力ランプ変動抑制の検討 -HP 台数制御を考慮した計画発電の検証-」, 平成 30 年電気学会全国大会, 福岡, 6-289 (2018)

市川翼, 原亮一, 北裕幸, 石川志保: 「HP/BG 併用熱供給システムによる風力発電出力ランプ変動抑制の検討-実証設備のモデリングおよびシミュレーション-」, 平成 30 年電力系統技術研究会, PSE-18-001, 神奈川(2018)

中村勇太, 原亮一, 北裕幸, 横川誠, 武田清賢: 「電力需給調整力提供を目的とした複数のコージェネレーションシステムの運用計画に関する基礎検討 -調整力割り当て方

法に関する一考察-」, 平成 29 年度電気・情報関係学会北海道支部連合大会, No.54, 函館 (2017)

秋岡竜太, 原亮一, 北裕幸, 石川志保: 「HP/BG 併用熱供給システムによる風力発電出力ランプ変動抑制の検討 -プラント条件に対する最適なサイト設計の基礎検討-」, 平成 29 年度電気・情報関係学会北海道支部連合大会, No.55, 函館 (2017)

市川翼, 原亮一, 北裕幸, 石川志保: 「HP/BG 併用熱供給システムによる風力発電出力ランプ変動抑制の検討 -実証設備のシミュレーションモデル-」, 平成 29 年度電気・情報関係学会北海道支部連合大会, No.56, 函館 (2017)

床本彩帆, 原亮一, 北裕幸, 石川志保: 「HP/BG 併用熱供給システムによる風力発電出力ランプ変動抑制の検討 -複数システムを対象とした制御手法による年間シミュレーション-」, 平成 29 年度電気・情報関係学会北海道支部連合大会, No.57, 函館 (2017)

中村勇太, 原亮一, 北裕幸, 田中英一, 横川誠, 武田清賢: 「電力需給調整力提供を目的とした複数のコージェネレーションシステムの運用計画に関する基礎検討 -システムによる影響を考慮した調整能力評価-」, 平成 29 年電力技術・電力系統技術合同研究会, PE-17-060, PSE-17-060, 北見(2017)

床本彩帆, 原亮一, 北裕幸, 田中英一, 石川志保: 「HP/BG 併用熱供給システムによる風力発電出力ランプ変動抑制の検討 -複数システムを対象とした制御手法の検討-」, 平成 29 年電力技術・電力系統技術合同研究会, PE-17-152, PSE-17-152, 北見(2017)

市川翼, 原亮一, 北裕幸, 田中英一, 石川志保: 「HP/BG 併用熱供給システムによる風力発電出力ランプ変動抑制の検討-実証設備の特性を考慮したシミュレーション-」, 平成 29 年電力技術・電力系統技術合同研究会, PE-17-153, PSE-17-153, 北見(2017)

原亮一, 北裕幸, 石川志保, 平瀬貴之: 「HP/BG 併用熱供給システムを用いた風力発電の計画発電手法」, 平成 29 年電気学会電力・エネルギー部門大会, 論文, No.33, pp.6-1-7~6-1-14, 東京 (2017)

床本彩帆, 原亮一, 北裕幸, 石川志保: 「HP/BG 併用熱供給システムによる風力発電出力ランプ変動抑制の検討-複数サイトを対象とした運用計画策定手法の精度検証-」, 平成 29 年電気学会電力・エネルギー部門大会, 論文, No.210, pp.6-2-11~6-2-12, 東京 (2017)

市川翼, 原亮一, 北裕幸, 石川志保: 「HP/BG 併用熱供給システムによる風力発電出力ランプ変動抑制の検討-実証設備の特性試験結果-」, 平成 29 年電気学会電力・エネルギー部門大会, 論文, No.211, pp.6-2-13~6-2-14, 東京 (2017)

市川翼, 原亮一, 北裕幸, 石川志保: 「HP/BG 併用熱供給システムによる風力発電出力ラ

ンプ変動抑制の検討-運用計画策定手法の改良と予測精度向上の効果-」,平成 29 年電気学会全国大会,富山,6-243 (2017)

床本彩帆,原亮一,北裕幸,石川志保:「HP/BG 併用熱供給システムによる風力発電出力ランプ変動抑制の検討-複数サイトを対象とした運用計画の検討-」,平成 29 年電気学会全国大会,富山,6-244 (2017)

市川翼,原亮一,北裕幸,石川志保:「HP/BG 併用熱供給システムによる風力発電出力ランプ変動抑制の検討-年間シミュレーションによる変動抑制能力の評価-」,平成 28 年度電気・情報関係学会北海道支部連合大会, No.42,札幌 (2016)

床本彩帆,原亮一,北裕幸,石川志保:「HP/BG 併用熱供給システムによる風力発電出力ランプ変動抑制の検討-複数サイトを対象とした運用計画の基礎検討-」,平成 28 年度電気・情報関係学会北海道支部連合大会, No.43,札幌 (2016)

平瀬貴之,原亮一,北裕幸,石川志保:「HP/BG 併用熱供給システムによる風力発電出力ランプ変動抑制の検討-計画発電の季節性評価-」,平成 28 年度電気・情報関係学会北海道支部連合大会, No.45,札幌 (2016)

澤田一真,原亮一,北裕幸,横川誠,武田清賢:「コージェネレーションシステムにおける調整力調達コストの評価-病院を対象とした調整力提供時間に関する考察-」,平成 28 年度電気・情報関係学会北海道支部連合大会, No.55,札幌 (2016)

①平瀬貴之,原亮一,北裕幸,石川志保:「HP/BG 併用熱供給システムによる風力発電出力ランプ変動抑制の検討-計画発電の検討-」,平成 28 年電力技術・電力系統技術合同研究会,PE-16-111,PSE-16-131,福井(2016)

②澤田一真,原亮一,北裕幸,横川誠,武田清賢:「コージェネレーションシステムにおける調整力調達コストの評価-調整力調達コストと調整力提供時間に関する考察-」,平成 28 年電気学会電力・エネルギー部門大会,論文, No.156, pp.2-5-3~2-5-4,小倉(2016)

③平瀬貴之,原亮一,北裕幸:「HP/BG 併用熱供給システムによる風力発電出力ランプ変動抑制の検討-計画発電の年間シミュレーション-」,平成 28 年電気学会電力・エネルギー部門大会,論文, No.157, pp.2-5-5~2-5-6,小倉(2016)

④床本彩帆,原亮一,北裕幸,田中英一:「時間前予測を用いた広域運用システムによる出力変動抑制手法」,平成 28 年電気学会電力・エネルギー部門大会,論文, No.286, pp.7-3-7~7-3-8,小倉(2016)

⑤ Kazuma Sawada, Ryoichi Hara, Hiroyuki Kita, Makoto Yokogawa, Kiyotaka Takeda: "Evaluation of the Procurement Cost of Reserved Capacity by Co-generation System", Proc. of International Conference on Electrical

Engineering (ICEE2016), No.90408, Okinawa,6pages (2016)

⑥平瀬貴之,原亮一,北裕幸:「HP/BG 併用熱供給システムによる風力発電出力ランプ変動抑制の検討-計画発電の年間シミュレーション-」,平成 28 年電気学会全国大会,仙台,6-220 (2016)

⑦澤田一真,原亮一,北裕幸,横川誠,武田清賢:「コージェネレーションシステムにおける調整力調達コストの評価-待機調整力とコストとの関係の評価-」,電気学会電力技術・電力系統技術・半導体電力変換技術合同研究会, PE-16-024 / PSE-16-044 / SPC-16-063 (2016)

⑧原亮一,北裕幸:「HP/BG 併用熱供給システムの等価蓄電池容量」,平成 27 年度電気・情報関係学会北海道支部連合大会, No.74,北見 (2015)

⑨濱本篤志,原亮一,北裕幸:「HP/BG 併用熱供給システムによる風力発電出力ランプ変動抑制の検討-WF 容量が制御結果へ与える影響の評価」,平成 27 年度電気・情報関係学会北海道支部連合大会, No.75,北見 (2015)

⑩平瀬貴之,原亮一,北裕幸:「HP/BG 併用熱供給システムによる風力発電出力ランプ変動抑制の検討-計画発電の基礎検討-」,平成 27 年度電気・情報関係学会北海道支部連合大会, No.76,北見 (2015)

⑪澤田一真,原亮一,北裕幸,横川誠,武田清賢:「コージェネレーションシステムにおける調整力調達コストの評価-家庭を対象とした評価-」,平成 27 年度電気・情報関係学会北海道支部連合大会, No.77,北見 (2015)

⑫濱本篤志,原亮一,北裕幸:「HP/BG 併用熱供給システムによる風力発電出力ランプ変動抑制の検討」,平成 27 年度電気学会電力技術・電力系統技術合同研究会, PE-15-125, PSE-15-147,宮城 (2015)

⑬濱本篤志,原亮一,北裕幸:「HP/BG 併用熱供給システムによる風力発電出力ランプ変動抑制の検討-リアルタイム制御手法の提案」,平成 27 年電気学会電力・エネルギー部門大会,論文, No.132,名古屋 (2015)

⑭澤田一真,原亮一,北裕幸,横川誠,武田清賢:「コージェネレーションシステムにおける調整力調達コストの評価-病院を対象とした評価-」平成 27 年電気学会電力・エネルギー部門大会,論文, No.245,名古屋 (2015)

## 6. 研究組織

### (1)研究代表者

北 裕幸 (KITA, Hiroyuki)  
北海道大学・大学院情報科学研究科・教授  
研究者番号:30214779

### (2)研究分担者

原 亮一 (HARA, Ryoichi)

北海道大学・大学院情報科学研究科・准教授

研究者番号：80361872