

科学研究費助成事業 研究成果報告書

令和 6 年 6 月 21 日現在

機関番号：10101

研究種目：基盤研究(C)（一般）

研究期間：2021～2023

課題番号：21K03992

研究課題名（和文）HP/CGS併用熱供給システムを用いた防災型地域マイクログリッドに関する研究

研究課題名（英文）Study on resilient microgrid using HP/CGS heat and power supply system

研究代表者

北 裕幸（Kita, Hiroyuki）

北海道大学・情報科学研究院・教授

研究者番号：30214779

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 3,100,000円

研究成果の概要（和文）：本研究では、ヒートポンプとコジェネレーションを併用する熱電併給技術を、マイクログリッド（MG）に導入し、その等価的な蓄電機能を利用して、再生可能エネルギー電源の不安定な出力変動を抑制しつつエネルギー供給を継続できる防災型の地域MGの内部構成及び運用・制御手法を提案し、その有効性を明らかにした。

具体的には、防災型地域MGの内部構成・容量並びに対応する設備コストをエネルギーフローベースで算定し、数値試算により、水素供給のための設備を導入することは自立的運用と調整力確保の両面で効果的であることが示された。その際にかかる追加投資も、回収可能な範囲の追加投資で実現可能であることを確認した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

災害等に伴う電力系統のブラックアウトや広域停電に対して、MG内に存在する再エネ、蓄電池、CGS、等のローカルリソースを適切にマネジメントすることにより、災害時にも長時間に亘ってエネルギー供給を継続できる防災型のエネルギーシステムを構築することが可能となった。その際、間欠的な出力変動特性を持つ太陽光発電（PV）や風力発電（WT）を安定に活用するために、熱や水素などMGに特有な他のエネルギー供給システムとの協調を図ることが重要であることが明らかとなった。

研究成果の概要（英文）： In this research, we introduce combined heat and power generation technology that uses heat pumps and cogeneration into a microgrid (MG), and utilize its equivalent power storage function to suppress unstable output fluctuations of renewable energy power sources. We proposed an internal configuration and operation/control method for resilient MG that can continue supplying energy, and clarified its effectiveness.

Specifically, we calculated the internal structure and capacity of a disaster-prevention regional MG and the corresponding equipment cost on an energy flow basis, and through numerical calculations, we found that introducing hydrogen supply equipment would be effective in ensuring autonomous operation and adjustment ability. It was shown to be effective on both sides. It was confirmed that the additional investment required at that time could be realized within the recoverable range.

研究分野：電力系統工学

キーワード：電力系統 マイクログリッド ヒートポンプ コジェネレーションシステム 蓄電池 水素 EV

様式 C - 19、F - 19 - 1 (共通)

1. 研究開始当初の背景

近年、市町村等のコミュニティ単位で、自営線あるいは系統配電線を活用し、太陽光、風力などの再エネ地産電源を面的に利用する、いわゆる地域マイクログリッド(MG)を構築する取り組みが多数見られるようになってきている。地域内のバイオガスあるいは再エネ由来の水素を燃料とするコジェネレーションシステム(CGS)を活用すれば、電力だけでなく熱エネルギーも自給する高効率なエネルギーシステムが構築され得るものと期待されている。

ところで、2018年9月6日に発生した北海道胆振東部地震に伴うブラックアウトや、至近年に発生した台風等による広域停電を契機として、災害時のリスク分散化に向けたインフラ整備の重要性が指摘されている。従って、地域MGにおいても、今後、需要サイドに多数導入されるであろう再エネ、蓄電池、CGS、等のローカルリソースを適切にマネジメントすることにより、災害時にも長時間に亘ってエネルギー供給を継続できる防災型の地域MGを構築していくことが望まれる。ただし、商用系統停電時には、間欠的な出力変動特性を持つ太陽光発電(PV)や風力発電(WT)が主力電源となるため、MG内の需給調整能力を向上させ、これらの電源を安定に活用できるように制御することが必要である。そのための機器として、従来から蓄電池が注目されてきているが、蓄電池は依然として高価である上、需給調整能力の持続性がkWh容量(時間容量)に依存することから、長時間の停電には耐えられない可能性がある。このため、熱やガスなどMGに特有な他のエネルギー供給システムとの協調をも視野に入れた新たな調整力を発掘することにより、蓄電池への依存度を最小限に抑えることが必要である。また、供給力が不足する場合には、重要負荷への電力供給を継続しつつ、小規模な範囲で負荷遮断を柔軟に行える機能も必要である。

2. 研究の目的

本研究では、研究代表者らがすでに提案しその有効性が確認されているヒートポンプ(HP)/コジェネレーション(CGS)併用熱供給システム(以下、HP/CGSシステム)を、主たる制御機器として用いた新しい防災型地域MGを構想し、その有効性を明らかにすることを目的とする。構想する防災型地域MGは、基幹系の送電ネットワークと一点で連系した独立性の高い配電システムであり、HP/CGSシステム及び小容量の蓄電池をMG内の複数の防災センターに分散配置する。各防災センターでは常時からHP/CGSシステムが近傍の需要家群に地域熱供給を行うと共に、その等価蓄電機能によって再エネの変動出力を平滑化しつつ需要家へ電力を供給する。また、商用系統の停電により地域MGが送電ネットワークから切り離された場合にも、HP/CGSシステムがセンター内の蓄電池と協調してMG全体の需給バランスを維持する役割を担いながら、電力・熱の供給を継続する。ただし、供給力の不足に対しては、各防災センターが例えば柱状変圧器単位で低圧配電線を順次解列しながら、需要家所有の蓄電池等を遠隔で制御し、配電線の重要負荷への電力供給を継続する。なお、HP/CGSシステムは、HPとCGSが併設された一種のPower to Heat(P2H)技術であるが、HPとCGSの合計の熱供給量を一定に維持したまま両者の熱供給割合を調整するだけで、配電システムとの電力のやりとり(蓄電池の充電・放電と等価)を柔軟に制御できるという特長がある。また、CGSの燃料となるガスはMG内に敷設されている都市ガス配管から供給を受けることとしており、本MGは電力とガスのマルチキャリアのエネルギーシステムとなっている。このため、商用系統停電時にはガスを用いてCGSが電力と熱を、ガス供給支障時にはHPが商用電力を用いて熱を自立的に供給できるため、高信頼のエネルギー供給を行えるものと考えられる。さらに、CGSの燃料としては地域MG内に存在するバイオガスや再エネ由来の水素を用いることも可能と考えられる。この場合、ガスも自給されることとなるため、信頼性がより向上すると期待される。

3. 研究の方法

本研究では、防災型地域MGの有効性を、設備設計段階の計画面、平常時の運用面、停電時の制御面の3つの観点から評価する手法を開発し、相互に関連付けながら実施する。

防災型地域MGの内部構成の設計：提案する防災型地域MGをまずエネルギーフロー図でモデル化し、各設備の容量設計を行う。すなわち、商用系統停電時においても、与えられたMG内の電力需要及び熱需要を満たすために必要なHP/CGSシステムや蓄電池等の容量を算定するツールを開発する。また、開発ツールを用いて、停電時に供給を継続する重要負荷量をパラメータとすると共に、CGSの燃料についても、3つのケース：1)都市ガス、2)バイオガス、3)水素(図3中の番号に対応)をそれぞれ想定した試算を行い、防災型地域MGの様々な内部構成・容量並びに対応する設備コストをエネルギーフローベースで算定する。

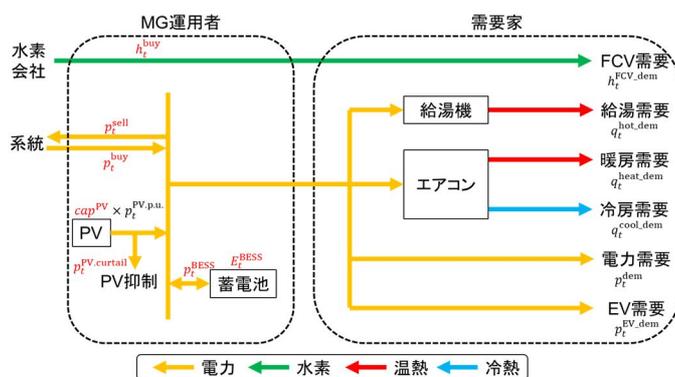
防災型地域MGの平常時の運用手法の開発：設計された各内部構成・容量に対して、商用系統と連系された平常時における防災型MGの短期の最適運用をシミュレートする手法を数理計画ベースで開発する。最適化においては、MGが外部から購入するエネルギーコストの最小化に加え、商用系統への依存度を予め低減しておくためのエネルギー自給率最大化、常時から災害時の余力を維持しておくための調整力最大化等が考えられる。この計算で求められる設備コスト+運用コストが防災型地域MGの総コストとなる。

停電時の防災型地域 MG の自立的緊急制御手法の開発： で求められた各内部構成および平常時の各最適運用に基づき，商用系統停電時の地域 MG の自立運用手法を時系列シミュレーションベースで開発する．(a)防災センターに導入される HP/CGS システムと蓄電池を用いて，MG 内の再エネ出力変動を抑制し，MG 内の需給バランスを維持するための制御手法を開発する．その際，HP/CGS システムは長周期変動成分を，蓄電池は短周期変動成分を担うような役割分担を考慮する．(b)MG 内の供給力が不足する場合，防災センターより下位の低圧配電システムを柱状変圧器単位で解列し，需給バランスを維持する制御手法を開発する．その際，解列された低圧配電線路上にある需要家所有の蓄電池を用いて，重要負荷への電力供給を継続することを考慮する．開発した制御手法を用いて商用系統停電時の MG 内の停電電力量や需給バランスの仕上がり状況等を解析することで，MG における災害時の信頼性を評価し，最終的にコストと信頼性の面で望ましい防災型 MG の姿を総合的に明らかにする．

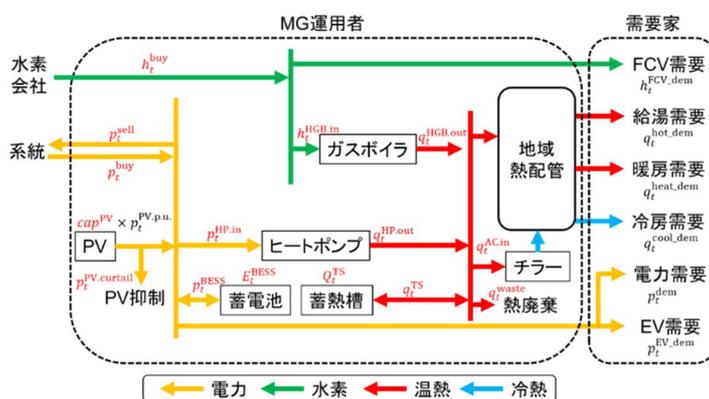
4．研究成果

4.1 構築した MG の内部構成とエネルギーフロー

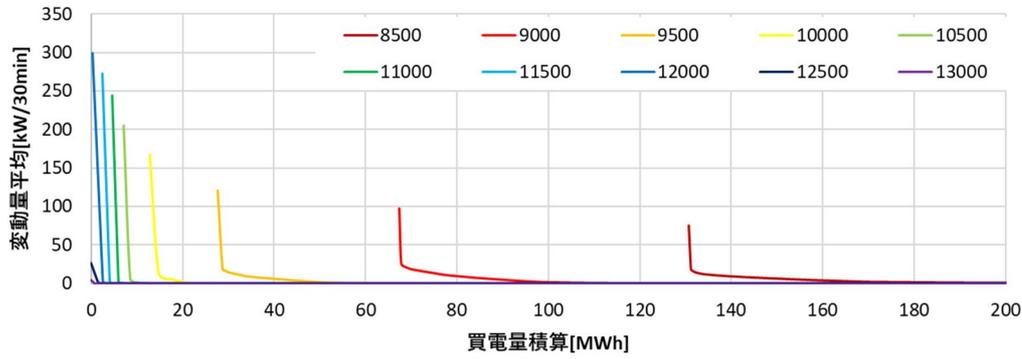
MG 内部の構成としては，系統電力，PV，購入水素といったエネルギー源を有しているものと仮定する．また，需要としては照明等の電力だけでなく給湯，空調，電気自動車 (Electric Vehicle: EV)，燃料電池自動車 (Fuel Cell Vehicle: FCV) を想定する．そのうえで，以下に示すような 3 種類のエネルギー供給方法を検討する．1 種類目は FCV 以外の需要をすべて電力の形で供給し，給湯や空調といった熱需要に対しては需要家機器 (エアコンや給湯器) で熱の形態に変換するタイプ A である．タイプ B は地域熱配管 (District Heating and Cooling: DHC) を敷設し電力を熱に変換するヒートポンプ (HP)，水素から熱を生み出す水素ガスボイラ (Hydrogen Gas Boiler: HGB) などを MG 側で用意するものである．また，タイプ C は MG 内で水電解装置 (Water Electrolyzer: WE) を用いて水素を製造することや燃料電池 (Fuel Cell: FC) によって水素から電気を生み出すことも想定したモデルである．上記 3 つのタイプそれぞれに対して容量設計問題を定式化し，MG が系統から購入する電力の積算値 (買電量積算，系統側で確保する供給力に相当) と系統電力の変動量 (変動量平均，系統側で確保すべき調整力に相当) という 2 つの指標の重みづけ和を最小化する多目的最適化問題を解く．コスト上限をパラメータとして与え重みを変化させることで各コストにおけるパレート最適解を導出する．図 1 に想定する MG のエネルギーフロー図を示す．



(a)タイプ A



(b)タイプ B



(b) タイプ B
図 2 パレート最適解

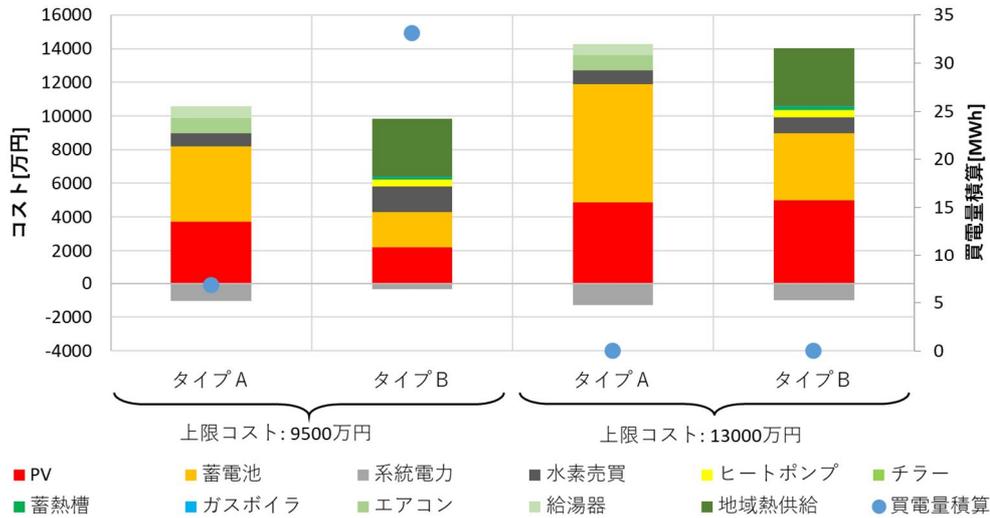


図 3 設備投資先比較 (変動量平均統一)

(2)水素エネルギーとのセクターカップリング効果

タイプ C においてはコスト上限が 8500 万円の時点で買電量積算も変動量平均も完全にゼロになっている。これは、水素エネルギーの統合が電力系統の貢献と、MG の経済的な運用に非常に大きなポテンシャルを持っていることを示している。図 4 はタイプ A, B, C の設備投資先を積み上げグラフで示したものである。タイプ C では、コストのうちの一部は水電解装置や燃料電池、水素タンクといった水素関連設備の導入に使用されている。PV の余剰電力を熱だけでなく水素に変えて貯蔵することで、必要なら季節をまたぐエネルギーシフトが可能となる。タイプ B では余剰電力を熱に変えることはできたが熱から電気を生み出す設備が存在せず、熱需要以上のエネルギーは系統に逆潮流として流すか、廃棄するしかなかった。一方タイプ C では燃料電池で水素から電気を生み出すことができる。これにより、タイプ A や B では実現しなかったエネルギーの有効利用が実現している。その結果、PV への過剰な投資や、高価な蓄電池への投資の回避が実現している。

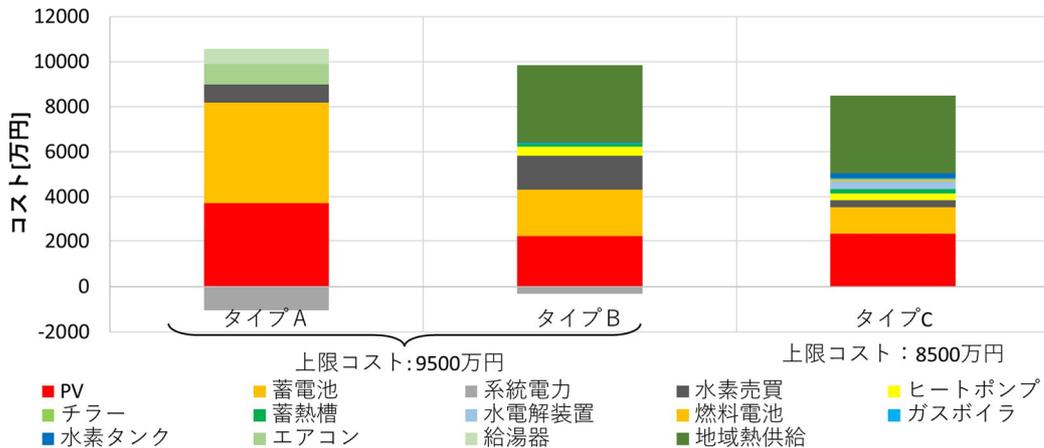


図 4 タイプ A, B, C 設備投資先比較

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計2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 喜田 勇志, 原 亮一, 北 裕幸	4. 巻 143
2. 論文標題 電力系統安定化に貢献するマイクログリッド構築 -需給調整力確保に伴う追加コスト-	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 電気学会論文誌B (電力・エネルギー部門誌)	6. 最初と最後の頁 157-164
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1541/ieejpes.143.157	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 Yushi Kida, Ryoichi Hara, Hiroyuki Kita	4. 巻 211
2. 論文標題 Impact of sector-coupling in microgrid to residual electricity demand properties	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Electric Power Systems Research	6. 最初と最後の頁 1-8
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.epsr.2022.108463	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 -

〔学会発表〕 計9件（うち招待講演 0件 / うち国際学会 1件）

1. 発表者名 Yushi Kida, Hiroyuki Kita
2. 発表標題 Impact of sector-coupling in microgrid to residual electricity demand properties
3. 学会等名 XXII Power Systems Computation Conference (PSCC 2022) (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 奥野典杜, 北裕幸
2. 発表標題 太陽光発電の出力と負荷の時間変化を考慮した災害後のマイクログリッド構成方法
3. 学会等名 令和4年電気学会電力・エネルギー部門大会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 喜田勇志, 北裕幸
2. 発表標題 災害時に自立運転可能なPVを主電源とするマイクログリッドの設計 - PV・蓄電池の必要容量の算定 -
3. 学会等名 令和5年電気学会全国大会
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 松永洸樹, 北裕幸
2. 発表標題 停電対策用蓄電池の確率的最低確保充電量 - 評価手法の提案
3. 学会等名 令和5年電気学会全国大会
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 奥野典杜, 北裕幸
2. 発表標題 開閉器区間ごとの自立運転を考慮した動的マイクログリッド構成 - 自立運転区間の順序決定手法の提案 -
3. 学会等名 令和5年電気学会全国大会
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 三村 和輝, 北裕幸
2. 発表標題 配電系統へのマイクログリッド導入設計手法に関する基礎検討
3. 学会等名 令和3年電気学会電力・エネルギー部門大会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 喜田 勇志, 北裕幸
2. 発表標題 マイクログリッド化による残余需要平準化効果の検証 コストと効果の関係
3. 学会等名 令和3年電気学会電力・エネルギー部門大会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 喜田 勇志, 北裕幸
2. 発表標題 マイクログリッド化による残余需要平準化効果の検証 電力と熱の供給の統合効果
3. 学会等名 電気学会電力技術・電力系統技術合同研究会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 喜田勇志, 北裕幸
2. 発表標題 電力系統安定化に貢献するマイクログリッド構築 - 調整力確保に伴う追加投資の評価 -
3. 学会等名 電気学会電力技術/電力系統技術/半導体電力変換合同研究会
4. 発表年 2022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
研究協力者	喜田 勇志 (Kida Yushi)		

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
研究協力者	奥野 典杜 (Okuno Norito)		
研究協力者	松永 洸樹 (Matsunaga Koki)		
研究協力者	三村 和輝 (Mimura Kazuki)		

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