

令和 2 年 5 月 22 日現在

機関番号：18001

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2017～2019

課題番号：17K00670

研究課題名(和文)再生可能エネルギーの大規模導入のための海水電解設備を導入したVPPの検討

研究課題名(英文)High Penetration Ratio of Renewable Energy for VPP introducing of Seawater Electrolyzer

研究代表者

千住 智信 (SENJYU, Tomonobu)

琉球大学・工学部・教授

研究者番号：40206660

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,600,000円

研究成果の概要(和文)：地球温暖化の緩和のためには再生可能エネルギーの大量導入が不可欠であるが、社会が要求する電力を安定に供給するためには様々な技術的課題や経済的課題が存在する。その両者の課題を解決するためには再生可能エネルギーを利用して発電された電力を貯蔵することが不可欠である。そこで本研究では、安価な電力を再生可能エネルギーから供給するために、海水電解装置を電力系統へ導入し、海水の電気分解で得られた水素を用いて安定な電力を供給する方法を提案している。目的を達成するための各種設備の最適な設備容量と最適な運用方法を最適化手法を適用することで明らかにした。

研究成果の学術的意義や社会的意義

今回の研究で得られた学術的意義は、不確実性を有する再生可能エネルギー由来の発電電力を安定でしかも安価に供給するための各種設備に関する最適な設備容量と最適運用方法を示したことである。今回は不確実性を有する発電電力を考慮して最適化手法を適用できた点が学術的に意義がある。

今回の研究成果を社会で普及させることにより化石燃料由来の二酸化炭素排出量を大幅に削減可能であるため、地球温暖化の進展を緩和することが可能となる。また、再生可能エネルギー由来の電力であっても安定かつ安価に供給可能である。

研究成果の概要(英文)：The introduction of a large amount of renewable energy is indispensable for mitigating global warming, but there are various technical and economic issues in order to stably supply the electric power required by society. In order to solve both problems, it is essential to store the electricity generated using renewable energy. Therefore, in this research, in order to supply economic electric power from renewable energy, we proposed a method of introducing a seawater electrolysis device into the electric power system and supplying stable electric power using hydrogen obtained by electrolysis of seawater. The optimum equipment capacity of various equipment and the optimum operation method to achieve the purpose were clarified by applying the optimization method.

研究分野：電力エネルギー工学

キーワード：再生可能エネルギー 電力エネルギー工学 電力系統

## 様式 C - 19、F - 19 - 1、Z - 19 (共通)

### 1. 研究開始当初の背景

2011年3月に発生した東日本大震災以降、原子力発電に代わる新たな発電設備として再生可能エネルギー発電設備 (Renewable Energy System、以下 RES) が注目されている。現状では、原子力発電の代替として LNG 等による火力発電が用いられており、石油資源の枯渇による二酸化炭素 (CO<sub>2</sub>) 排出量の増加に拍車をかけている。これらの問題を阻止するために、2005年には、主要先進国における温室効果ガス排出削減目標を定めた京都議定書が採択され、さらに、2016年11月には全ての国が温室効果ガス排出削減に取り組むパリ協定が発効した。日本はCO<sub>2</sub>を削減しているが、このままでは目標を達成することは難しいため大幅に温室効果ガスを減少させる必要がある。

日本は多くの離島を所有する海洋国家であり、その多くは独立した電力系統を持つ。その電力系統における電力需要の大部分をディーゼル発電機 (Diesel Generator、以下 DG) による発電電力で賄っている。DGは燃料として重油を用いており、離島の場合は重油の燃料費に加えて輸送費を要するため経済的負担が大きく、RESに対する期待が高まっている。

RESは自然エネルギーに依存しているため、CO<sub>2</sub>を排出せずクリーンなエネルギー源である。しかし、導入するには高い初期投資コストが必要であるため、現時点では大量導入は困難である。また、自然エネルギーを使用しているため、発電電力が天候等の環境に依存していることから発電電力の不確実性の性質を有している。この発電電力の不確実性への対策として、蓄電池設備 (Battery Energy Storage System、以下 BESS) が導入されている。BESSは、不足電力や余剰電力を充放電によって調整することができるため、非常に有効な設備であるが、RESと同様に非常に高価な設備となっている。

RES同様に化石燃料を用いず、CO<sub>2</sub>を排出しない燃料電池 (Fuel Cell、以下 FC) が注目されている。FCは水素タンクと併設することにより、電力供給不足が生じた場合には水素と大気中の酸素を反応させることによって発電することが可能である。また、海水電解設備を導入することで、日本に豊富に存在する海水を水素へと変換し、貯蔵することも可能である。

これらの設備のみで構成される HRES (Hybrid Renewable Energy System) を設計する研究では、大量の設備容量が必要となつて設備コストが膨大となっているため、既存の DG 等の設備と組み合わせる必要がある。

### 2. 研究の目的

離島のような DG をベース電源とする小規模な電力系統において、太陽光発電設備 (Photovoltaic、以下 PV)、風力発電設備 (Wind Generator、以下 WG)、BESS、FC、水素タンク、水素圧縮機、及び海水電解設備を導入した際の最適な各設備容量及び、運用スケジュールを決定するとともに、再生可能エネルギー導入促進のために研究を行う。

### 3. 研究の方法

#### (1) 想定するモデル

本研究では電力需要ピークが約 1 MW である沖縄県粟国島相当のモデルを想定している。粟国島の電力系統は沖縄本島と送電線で連系されておらず、可倒式の風力発電設備と安定運用のための蓄電池設備、DG を主体とする内燃力発電設備で構成されている。想定する電力系統モデルは図 1 のような PV、WG、DG、BESS、FC、水素タンク (H<sub>2</sub>Tank)、水素圧縮機 (Compressor)、海水電解設備 (Electrolysis Plant) で構成されており、ユニット化された各設備の設置台数が変動するとそれに比例して発電電力も増加すると想定する。

本研究でシミュレーションに使用する負荷需要データは沖縄電力のホームページより得られるデータを用いており、PV 及び WG の発電電力データは気象庁のホームページより得られる日射量及び風速データを用いて推定した。

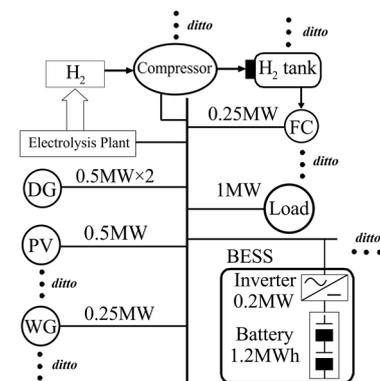


図 1: 想定するモデル

#### (2) 目的関数

本研究では、想定した電力系統における各設備容量を検討するため、本問題を TC (Total Cost) 最小化問題として定式化した。使用する最適化手法は混合整数線形計画法 (Mixed-Integer Linear Programming、以下 MILP) である。その目的関数を(1)式に示す。

$$\min: TC = \sum_{i=1}^I \sum_{t=1}^{NT} \left\{ n_i Cost_i + F_i(t) (P_{DG_i}(t)) \right\} \quad (1)$$

$$I = \{PV, WG, BESS, FC, Tank, Comp\} \quad (2)$$

ここで、TCはトータルコスト[Yen]、*i*は設備の指標、*I*は設備の集合、*n<sub>i</sub>*は設備*i*の設置台数、*Cost<sub>i</sub>*は設備*i*の設備コスト[Yen]、*NT*はシミュレーション期間[h]、*F<sub>i</sub>(t) (P<sub>DG<sub>i</sub>(t))</sub>*は各時間*t*におけるDG<sub>*i*</sub>の燃料費[Yen]、*P<sub>DG<sub>i</sub>(t)</sub>*はDG<sub>*i*</sub>の出力[kW]である。また、DGの燃料費は(3)式となる。

$$F_i(t) \left( P_{DG_i}(t) \right) = \frac{Q \times P_{DG_i} \times PR_c}{Q_c \times \eta_i} \quad (3)$$

ここで、 $Q$ は発熱量[kJ/kW]、 $PR_c$ はC重油の価格、 $Q_c$ はC重油の発熱量、 $\eta_i$ は発電効率であり、図2にその特性を示す。DGを高効率で運転するためには、100%出力運転が停止させることが必要である。また、表1に各設備パラメータを示す。

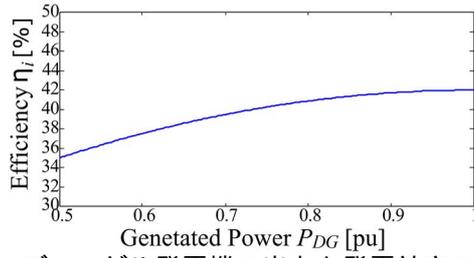


図2：ディーゼル発電機の出力と発電効率の特性

表1：各設備パラメータ

PV 定格出力 [kW]	500
WG 定格出力 [kW]	250
BESS 定格出力/容量 [kW/kWh]	200/1200
FC 定格出力 [kW]	250
発熱量 $Q$ [kJ/kW]	9,970
C 重油の価格 $PR_c$ [円/kL]	66,596
C 重油の発熱量 $Q_c$ [kJ/kL]	$41.9 \times 10^6$

### (3) 制約条件

本研究で考慮した制約条件を以下に示す。

- BESS 同時充放電不可制約

$$u_c(t) + u_d(t) \leq 1 \quad (4)$$

- 蓄電池エネルギー残存率(SoC)制約

$$0.2n_{bess}cap_{bess} \leq \sum_{t=1}^j \left( \eta_c P_c(t) - \frac{1}{\eta_d} P_d(t) \right) + SoC_{ini} \leq 0.8n_{bess}cap_{bess} \quad (5)$$

- BESS 最大充放電電力制約

$$P_c \leq n_{bess} p_c^{max} \quad (6)$$

$$P_d \leq n_{bess} p_d^{max} \quad (7)$$

- 各設備最大出力制約

$$P_c \leq n_{bess} p_c^{max} \quad (8)$$

$$P_d \leq n_{bess} p_d^{max} \quad (9)$$

$$P_{FC} \leq n_{FC} p_{FC}^{max} \quad (10)$$

- 水素タンクの水素充填率制約

$$0.05n_T cap_T \leq \sum_{t=1}^j \left( f P_{El}(t) - \frac{1}{g} P_{FC}(t) \right) + HFR_{ini} \quad (11)$$

$$\sum_{t=1}^j \left( f P_{El}(t) - \frac{1}{g} P_{FC}(t) \right) + HFR_{ini} \leq 0.95n_T cap_T \quad (12)$$

- 水素タンク及び水素圧縮機の水素処理量制約

$$f P_{El}(t) \leq n_T Q_{H_2}^{max} \quad (13)$$

$$f P_{El}(t) \times 2.2 \times \frac{\ln(PRF / 0.1)}{\ln(20 / 0.1)} \leq n_{Comp} P_{Comp} \quad (14)$$

- 電力需給バランス制約

$$n_{pv} P_{pv}(t) + n_{wg} P_{wg}(t) + n_{FC} P_{FC}(t) + P_{DG}(t) + n_{bess} (P_d(t) - P_c(t)) - P_{El}(t) - P_{Comp}(t) - P_{sur} = P_L(t) \quad (15)$$

## 4. 研究成果

### (1) シミュレーション条件

本研究では、年間を考慮した最適設備容量を決定するために、クラスタリングによって膨大な1年間の電力需要データを数種類の電力需要データで表現し、シミュレーションデータとして使用した。クラスタリングに使用する1年間の正味負荷需要、クラスタ数を決定するためにエルボー法によって得られたエルボー図、及びクラスタリングによって決定された代表的な日をそれぞれ図3~5に示す。

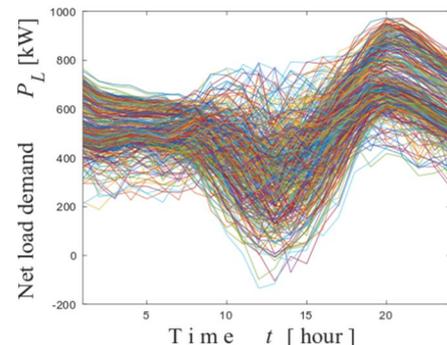


図3：正味負荷需要のデータセット

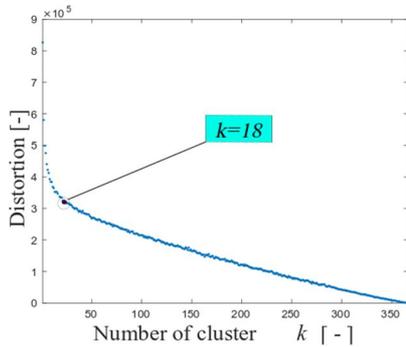


図 4：エルボー図によるクラスタ数の決定

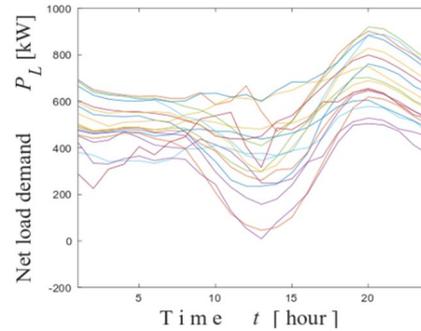


図 5：クラスタリングによって得られた代表的な日のデータ (k=18)

### (2) シミュレーション結果

本研究では、提案する電源構成の有用性を示すために比較対象を導入する。Case1 として、PV、WG、BESS、DG で構成された電力系統における設備容量と運用スケジュールを決定した。同様に電源構成が PV、WG、BESS のものを Case2、PV、WG、BESS、FC (水素タンク等を含む) のものを Case3、PV、WG、BESS、DG、FC のものを Case4 としてそれぞれ設備容量と運用スケジュールを決定した。シミュレーションによって得られた各設備容量、コスト、及び余剰電力を表 2 に示す。また、シミュレーションによって決定された各 Case の 2 日間の運用スケジュールを図 6~9 に示す。この結果より、Case2 では天候の不確実性や発電することができない夜間等の問題もあり多くの設備が必要となっているためトータルコストが非常に高額となるが、DG を含む Case1 ではコストが削減できていることがわかる。また、Case3 のように FC を導入することで余剰電力を水素として貯蓄することができるため、BESS のみでは完全に充電することができなかった余剰電力を零にすることができる。Case4 は Case1 と比較してシステムコストは増加しているが DG の燃料費と余剰電力が減少していることがわかる。

表 2：シミュレーション結果

	Case1	Case2	Case3	Case4
PV	4	15	8	5
WG	3	10	9	4
BESS	2	20	9	3
FC	0	0	2	1
Tank & Compressor	0	0	4	1
システムコスト [万円]	383	1520	958	457
DG の燃料費 [万円]	496	0	0	377
トータルコスト [万円]	878	1520	958	834
余剰電力 [MWh]	40.6	34.4	0	0
CO2 排出量 [tCO2]	93.3	0	0	70.1

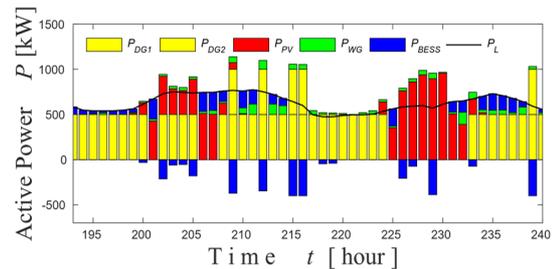


図 6：Case1 の 2 日間の運用スケジュール

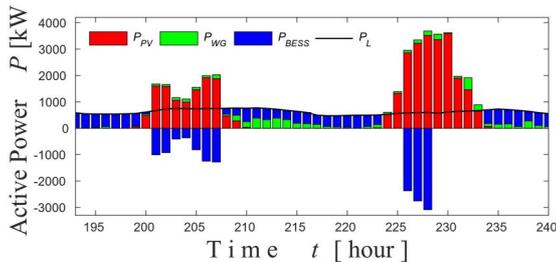


図 7：Case2 の 2 日間の運用スケジュール

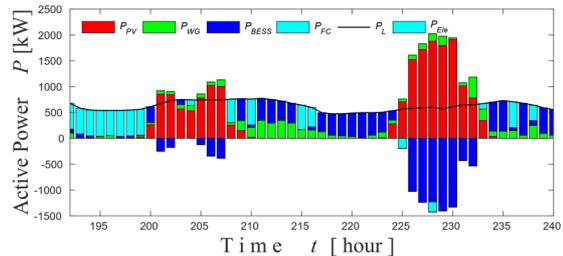


図 8：Case3 の 2 日間の運用スケジュール

### (3) むすび

本研究では小規模離島の電力系統において PV、WG、BESS 及び FC と海水電解設備を導入した際の最適設備容量を検討した。日本において再生可能エネルギー設備や蓄電池は未だコストが高く、大量導入が難しいため DG と組み合わせる必要があるが、DG は CO<sub>2</sub> を排出するため、将来的に減らしていく傾向にあると思われる。そこで本研究では、FC 及び海水電解設備を用いることでトータルコスト及び DG 燃料費の削減が可能であることを示した。

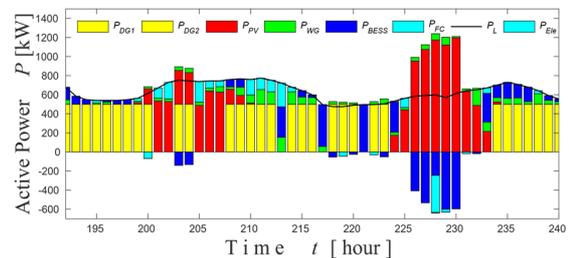


図 9：Case4 の 2 日間の運用スケジュール

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計1件（うち査読付論文 1件/うち国際共著 1件/うちオープンアクセス 1件）

1. 著者名 Liu Lei, Matayoshi Hidehito, Lotfy Mohammed, Datta Manoj, Senjyu Tomonobu	4. 巻 11
2. 論文標題 Load Frequency Control Using Demand Response and Storage Battery by Considering Renewable Energy Sources	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Energies	6. 最初と最後の頁 3412 ~ 3412
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.3390/en11123412	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている（また、その予定である）	国際共著 該当する

〔学会発表〕 計3件（うち招待講演 0件/うち国際学会 1件）

1. 発表者名 杉村 諒, 千住 智信, 高橋 弘
2. 発表標題 多目的最適化手法を用いた小規模電力系統における再生可能エネルギー設備容量の検討
3. 学会等名 電気学会研究会電力技術/電力系統技術/半導体電力変換合同研究会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 桃原翔太, 千住智信
2. 発表標題 海水電解設備を導入した小規模電力系統における最適運用方法及び最適設備容量の検討
3. 学会等名 平成29年度電気・情報関係学会九州支部連合大会
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 Shota Tobaru, Foday Conteh, Abdul Motin Howlader, Tomonobu Senjyu, and Toshihisa Funabashi
2. 発表標題 Optimal Sizing of PV-Wind-Battery Power System Considering Demand Response Programs
3. 学会等名 IEEE International Conference on Power Electronics and Drive Systems (PEDS) (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
--	---------------------------	-----------------------	----