

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 29 年 8 月 16 日現在

機関番号：23201

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2014～2016

課題番号：26350431

研究課題名(和文) 自律分散型発電・消費ネットワークの最適化モデルとルーティング則の開発

研究課題名(英文) Development of optimization models and routing algorithms for decentralized energy networks

研究代表者

榊原 一紀 (Sakakibara, Kazutoshi)

富山県立大学・工学部・准教授

研究者番号：30388110

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)：自律分散型の発電・消費ネットワークの効果的実現の為に必要なシステム構成および要素技術に求められる仕様を、種々の最適化モデルを導入・比較することにより明らかにすることを目的とする。この目的の下で、システムを構成する発電機や蓄電池、コンバータ、あるいは発電・消費電力量予測器などの各種電力機器に求められる構成とスペックを全体最適の立場から明らかにする。さらに、そこで明らかになったシステム特性を踏まえ、電力ルーティング則を開発し、個々の電力機器がシステム全体の挙動に対して適応的に振る舞い、全体効率を向上させる仕組みを見出した。

研究成果の概要(英文)：We aim to develop the mathematical programming model of decentralized energy networks, and to demonstrate the specification requested for the energy facilities in the networks such as PV, wind power generators, energy converters and batteries to satisfy the overall system efficiency goal. Then we develop the energy routing algorithm based on the optimization results by the mathematical programming model.

研究分野：システム最適化

キーワード：自律分散型エネルギーネットワーク 再生可能エネルギー 数理計画

1 研究開始当初の背景

二酸化炭素の過剰な排出に伴う地球環境の変動や化石燃料の枯渇、また、2011年3月の東日本大震災に起因する電力供給の低下などに伴い、発電・送電の形態についての見直しが必要になっている。その一方策として、太陽光発電や風力発電をはじめとした再生可能エネルギーへの転換が求められている。しかし再生可能エネルギーの普及にあたり、解決しなければならない様々な問題がある。例えば、再生可能エネルギーは太陽光や風力といった自然現象を利用した発電となっており、天候や季節等の自然状況に左右されやすく不安定である。また現在、再生可能エネルギーを利用した発電では発電量が少ないといった問題がある。このような問題を解決するために再生可能エネルギーを利用した様々なシステムが考案・検証されつつある。しかし、これらのシステムを設計する上で、再生可能エネルギーを効率的かつ安定的に利用できる最適な機器の構成を検証および決定することは困難である。さらに、機器の構成を考える上では、様々な運用計画を考慮し、様々な状況にも耐えうるシステム構成を考える必要がある。本研究では、数理最適化手法を用いてこれらのシステムが再生可能エネルギーによる発電を利用して、効率的かつ安定的に電力供給を行うための諸条件を明らかにすることを目指す。

2 研究の目的

本研究では前章で示したシステムのひとつである太陽光および風力発電を利用した離島を対象とした自律分散型スマートグリッドと小水力発電を利用した農村地帯におけるバッテリー交換ステーションの2つに数理最適化手法を用いてシミュレーションを行い、各要素技術の最適な構成を見出す。

スマートグリッドに関しては、エネルギーを消費する需要家が各々で太陽光や風力発電を行い、かつ、これらが電力ネットワークで結ばれることにより、相互に電力を融通できるような自律分散型の発電および消費方式が様々な観点から考案・実証がされつつある。そこで、環境省の平成24年度地球温暖化対策技術開発・実証研究事業のひとつである「離島・漁村における直流技術による自立分散エネルギーシステム技術の実証実験」に参加し、兵庫県にある離島「沼島」において、直流バス、太陽光発電機、風力発電機、バッテリー、直流/交流電力消費機器等の各種要素技術が電力ネットワークを構成した際に、全系で安定して効率的な電力供給を行える諸条件を明らかにする。ここでは、離島における消費電力と発電電力(太陽光・風力)の実測値に基づき、最適化計算による最適システム構成を見出す。

また小水力発電を利用したバッテリー交換ステーションに関しては、現在水力発電はダムや発電所を建設する上でほとんどの場合、住宅や農林業を営む場所を水没させなければならないため、周辺の自然環境を破壊する恐れがある。また現在、日本国内で新たに大型のダムを建設する場所の確保は難しいといった問題もある。そこでこのような問題を解決する方法として、新たな発電形式

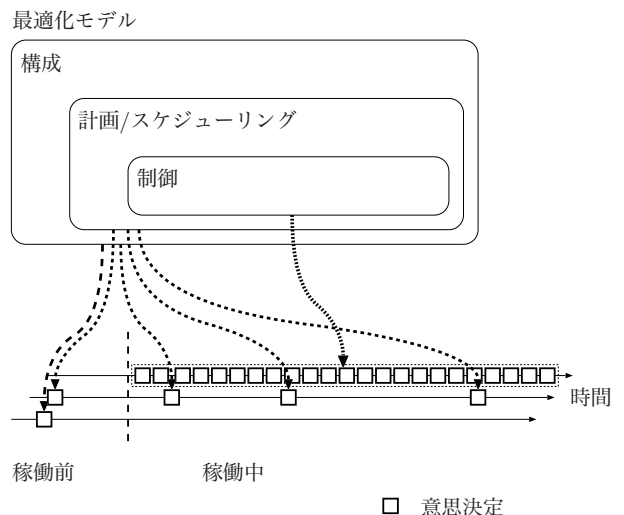


図1: システム構成・運用・制御の最適化

である小水力発電がある。用水など比較的小さな水路に流れる水で発電する小水力発電は、新エネルギー利用等の促進に関する特別措置法における新エネルギーとして定義され、近年注目を集めている。また農村地帯において、日々の農業活動に使用する軽トラックをEV(電気自動車)化すると共に、農業用水を流れる水の水力による小水力発電の電気を利用して電気自動車および小水力発電の普及促進を目指すといった動きもある。そこでは電気自動車を利用する方法として、電気自動車化した軽トラックに交換型のバッテリーを搭載し、さらに農業地帯に複数の小水力発電を設けてその場所でバッテリーを充電する。そして電力が低下したバッテリーと充電したバッテリーを交換するといった「バッテリー交換ステーション」という仕組みが考案されている。しかしこのようなシステムを構築するにあたり、設備の最適な容量や配置等を決めること、また安定した運用を行うことは難しい。このような問題に対して、各要素技術で構成されたシステムの安定した運用を行うための諸条件を明らかにする方法として数理最適化手法を用いた研究がなされている。本稿では、このバッテリー交換ステーションを構成する電気自動車、小水力発電、バッテリーの各要素の最適な構成および配置を明らかにするために、バッテリーの充放電をスケジューリング問題として扱いモデル化する。そしてこの問題に対して数理計画を用いることでこの仕組みを達成するための諸条件を明らかにする。

3 研究の方法

3.1 システムの階層性

一般に生産工場などのシステム設計にあたっては、物理的な構造物の設計に加えて、システム稼働時における生産計画やスケジューリング(まとめて「運用」と呼ぶ)、さらには機器の制御などを考慮する必要がある。システムの構成、運用、制御は互いに独立に問題定義(モデル化)できるわけではなく、階層的な意思決定構造を持つ(図1)。ここで述べる意思決定の「階層性」とは、最適

化モデルとして問題を記述した際に、一方が他方の決定もしくは評価値に基づき自身の評価関数あるいは制約条件を定める関係を有し、さらにはその関係が対称的ではない、という構造を示す。一方で意思決定のタイミングに注目すると、システムの構造設計と運用計画は稼働前もしくは稼働中に与えられるのに対して、制御は稼働時において(すなわちリアルタイムに)与えられる。

3.2 構成最適化問題のモデル

3.1節に示したような特徴を有する設計問題を最適化問題としてモデル化することを考える。なお以下では本論文で対象とする電力システムに限定して議論を進めるものとする。まず、システム構成および運用最適化問題の決定項目を以下のように(形式的に)記述する。

- システム構成最適化: P
- 運用最適化: X

またシステム構築・運用にあたって、電力量の計測値 d_k を外生的に与えられるものとし、 D と表す。このとき、 X は期 k 単位での決定となる(すなわち添字が k となる)のに対して、 P は運用期間中一定値(\hat{P} と表す)をとる(すなわち添字 k が無い)。

最適化対象となる期間は P, X 共に $[1, T)$ であるが、数理モデル化にあたり、 $[1, T]$ の最適化問題を考える。ここで外生変数 D は、期 k を添字として持つ時系列データであり、また、 D は日、週、季節単位の周期性を有しているため、それらに応じて T の値が定まる。 X に対して T は比較的短い(日/週オーダー)一方で、 P に対しては、設備投資の減価償却を考慮すると、月あるいは年オーダーとなる。ここで $\{P, X\}$ の $[1, T]$ における全体最適化モデルを考える。このとき目的関数は以下のように表される

- システム構成最適化: $f^P = f^P(P)$
- 運用最適化: $f^X = f^X(X; P)$

$\{P, X\}$ の全体最適化を考えた場合、月あるいは年オーダーの T をそのままの形で取り扱うことは、計算量的に困難となる。そこで、 D を部分集合 $D_\ell (\ell \in D; D = \{D_1, \dots, D_\ell, \dots, D_{N^D}\})$ に分解して取り扱うことを考える。なお $D_\ell, D_{\ell+1}$ の k に関する連続性は仮定しない。一方で、解析対象の D の時系列特性を反映した D_ℓ を十分数用意することが求められる。このとき D_ℓ は、 X の周期性を反映した期間 (T_ℓ と表す)をとるものとする。また f^P と f^X は D_ℓ に関して以下のように分解できる

- $f_\ell^P = f_\ell^P(P_\ell), \ell = 1, \dots, N^D$
- $f_\ell^X = f_\ell^X(X_\ell; P_\ell), \ell = 1, \dots, N^D$

以上の準備の下、全体最適化モデルは次のように表される

Minimize

$$g(f_\ell^P, f_\ell^X) \quad (1)$$

Subject to

$$A(P_\ell, X_\ell) = \mathbf{b}_\ell, \ell = 1, \dots, N^D \quad (2)$$

$$P_1 = \dots = P_\ell = \dots = P_{N^D} (= \hat{P}) \quad (3)$$

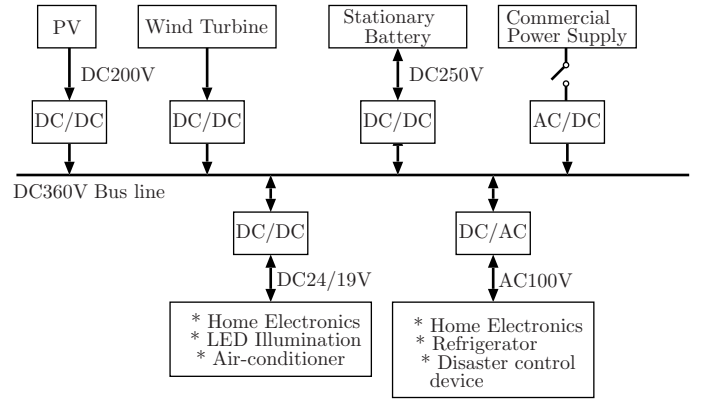


図 2: システム構成

ただし、 $P = \{P_1, \dots, P_\ell, \dots, P_{N^D}\}$, $X = \{X_1, \dots, X_\ell, \dots, X_{N^D}\}$ である。

ここで式 (1) で表される $g(\cdot)$ は、以下の式で表される

$$g = \begin{cases} \min_\ell \{ \cdot \} : & \text{システム構成の最良パフォーマンス} \\ \max_\ell \{ \cdot \} : & \text{システム構成の最悪パフォーマンス} \\ \text{avg}_\ell \{ \cdot \} : & \text{システム構成の平均パフォーマンス} \end{cases}$$

このように表される最適化問題を解くにあたっては、式 (3) があるために $\{P_\ell, X_\ell\}$ 単位の部分問題 (M_ℓ とよぶ) に分解することはできない。以下のような方法に基づき \hat{P} を与えた上で、式 (3) を緩和した問題を求解することが考えられる

- 方法 (a) \hat{P} に対して複数の値を用意し、各値を部分問題の定数値として取扱い、それぞれ最適化する
- 方法 (b) \hat{P} に対して複数の値を用意し、各部分問題において右辺定数 \mathbf{b}_ℓ として表す。これらに対してそれぞれ双対最適解を求めることにより、目的関数に対する感度を得る

3.3 離島における直流スマートグリッドの最適設備構成の導出

ある一定期間(長さ Δt)の電力量の計測値 d_k ($k = 1, \dots, K$) が与えられるものとする(図 3)。

最適化にあたっては、 Δt ごとに意思決定が与えられるものとする。基本要素として以下のものを用意する。

▷ 電力クラス C_i ($i = 1, \dots, N$):

- 太陽光発電機 G_i^P .
- 風力発電機 G_i^W .
- 直流消費機器 D_i^D .
- 交流消費機器 D_i^A .
- 固定バッテリー B_i^F .
- 電力変換器(太陽光) E_i^P .
- 電力変換器(風力) E_i^W .
- 電力変換器(直流消費) E_i^{DD} .
- 電力変換器(交流消費) E_i^{DA} .
- 電力変換器(固定バッテリー) E_i^{BF} .
- 電力変換器(系統電力) E_i^S .

▷ 系統電力 S .

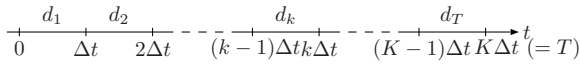


図 3: 計画期間と計測データ

これらの定数・変数と電力クラスとの関係を Fig. 4 に示す。

図 2 に、ここでのシステムの構成を示しておく。

3.3.1 最小設備コストの導出

前項で示した定数・変数を用いることにより、運用する上で各設備簿コストを抑えるようにするために線形計画モデル \mathcal{M}_ℓ を以下のように構築する。また系統電力 S に関しては、式 (6) のように ε -制約として扱う。その際に、系統電力依存度 β をパラメータとして与える。

3.3.2 最小設備容量の導出

運用する上で必要最小設備容量を導出するために、前項の線形計画モデルの目的関数および制約条件ををを変更し、 ε 制約化することにより再構築する。

3.3.3 実験設定および方法

最適解導出に際しては、数理計画ソルバ IBM ILOG CPLEX12 を用いた。 \mathcal{M}_ℓ を用いた評価実験における実験設定を以下に記す：

実験 1: 最小設備容量の導出

- 決定変数: PV 発電容量 β^P [kW], 風力発電容量 β^W [kW] およびバッテリー容量 \bar{b}^F [kWh]
- 目的関数: β^P , β^W および \bar{b}^F の最小化 (多目的)
- 最適化方法: S を ε -制約扱いとして、また β^P および \bar{b}^F をパラメータとして単一目的関数 G^W を最小化する。

実験 2: 最小設備コストの導出

- 決定変数: PV 発電容量 β^P [kW], 風力発電容量 β^W [kW] およびバッテリー容量 \bar{b}^F [kWh] (実験 1 と同じ)
- 目的関数: β^P , β^W および \bar{b}^F に対するコストの総和 C 。
- 最適化方法: S を ε -制約扱いとして、 C を最小化する。ただし、設備導入コスト係数を
 - PV 発電機コスト $E^P = 27.5$ [万円/kW],
 - 風力発電機コスト $E^W = 20$ [万円/kW],
 - バッテリーコスト $E^B = 4$ [万円/kWh].
 と与えた下で (資源エネルギー庁 2014 年試算に基づく)

$$C = E^P \beta^P + E^W \beta^W + E^B \bar{b}^F$$

を計算する。

4 研究成果

4.1 実験 1: 結果

系統電力総量 S および消費電力量 $D = \sum_t d_t^D$ から定義される系統電力依存度 $\eta = S/D$ に対してそれぞれ最

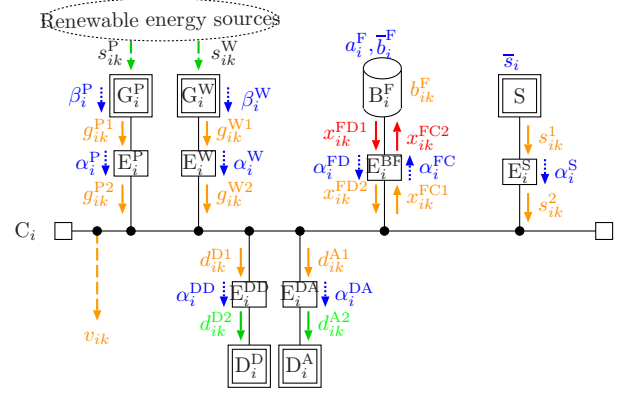


図 4: システム構成と変数・定数の関係

小設備容量を導出する。図 5, 6 および図 7 に $\eta = 0.1, 0.3$ および 0.5 に対する設備導入量をそれぞれ示す。

なお図中の 'Bcap' はバッテリー容量 \bar{b}^F を表す。

これらの図より以下のことが確認される：

- 各系統依存度を実現する最小発電容量においては、風力発電容量に比べて PV 発電容量が小さい。
- 小さい系統依存度の下では、バッテリー容量が十分容量 (300kWh 以上) 必要となる。

4.2 実験 2: 結果

図 8 に系統電力依存度 η に対する設備導入コスト C を示す。図 9 および図 10 に C の最小値を与える PV 発電容量 [kW] およびバッテリー容量 [kWh] をそれぞれ示す。なおコスト最小化の下では、風力発電機の導入量は全ての場合において 0 となった。

これらの図より以下のことが確認される：

- 系統依存度が小さくなるにつれて、PV 発電容量およびバッテリー容量が顕著に大きくなる。
- 系統依存度が 0.2 以上の条件では、ほぼ PV 発電のみでの設備構成が最小設備コストを与える。

4.3 まとめと今後の課題

本研究では、自律型の電力ネットワークの運用最適化モデルを示すとともに、それに基づく構成最適化の方法を示した。また、発電・需要電力の測定データを用いた最適化計算に基づき、島全体への適切な電力ネットワークの構成を、機器容量の観点から見出した。なお、今回の場合はシステム全体効率の指標として、系統電力依存度を用いた。今後は、系統電力依存度や自然エネルギー有効活用度に加え、これらから計算される CO₂ 排出量および各種電力機器の費用対効果を考慮する予定である。ここでの線形計画モデルに基づく解析では、電力消費 (電力利用者の行動) を外生変数として扱っている。今後は、さらに利用者の行動変容をモデルに組み込むことも考えている。さらに、複数の電力ネットワークを想定し、ネットワーク間で移動可能な蓄電池としてモバイル蓄電池を導入することを考える。モバイル蓄電池を導入することにより、グリッド間の電力融通が可能となり、非常事態 (停電等) への迅速な対応 (アジリティ) が可能となる。

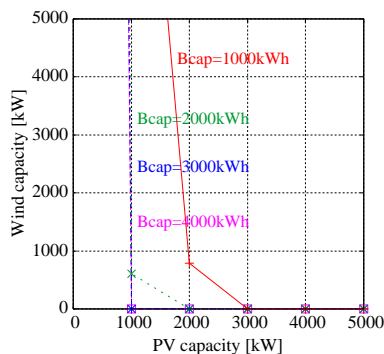
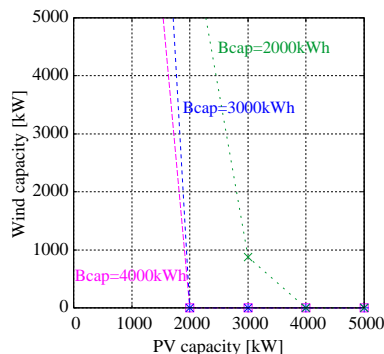
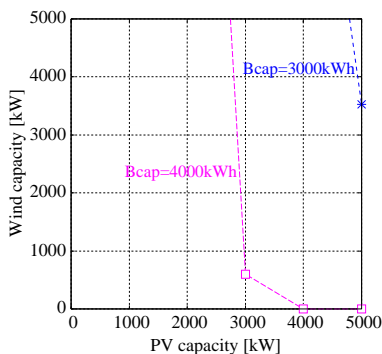


図 5: 設備導入量 (系統依存度 0.1) 図 6: 設備導入量 (系統依存度 0.3) 図 7: 設備導入量 (系統依存度 0.5)

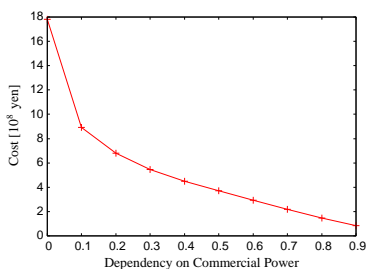


図 8: 設備導入コスト

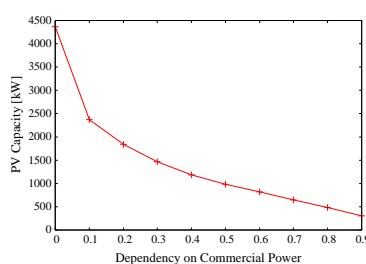


図 9: PV 発電機容量

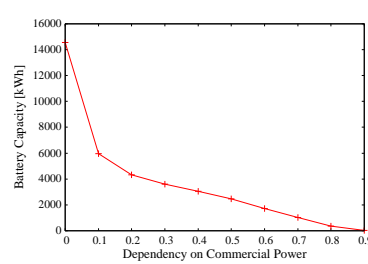


図 10: バッテリー容量

5 主な発表論文等

[雑誌論文] (計 5 件)

1. 谷口一徹, 西原英, 福井正博, 榊原一紀, リチウムイオン蓄電池のサイクル劣化抑制を指向した EDLC を持つ分散型電力ネットワーク向け最適電力融通手法, 電気学会論文誌 C, Vol.134, No.1, pp.69-77, 2014.
2. K. Sakakibara, I. Taniguchi, T. Matsumoto and H. Tamaki, Structural Optimization of a Self-sustainable Decentralized Energy System by Mathematical Programming Techniques, Procedia Technology, Vol. 18, pp.6871, 2014.
3. I. Taniguchi, T. Matsumoto, H. Miura, K. Sakakibara and H. Tamaki, Abstract System Model of DC Microgrid Systems for Fast and Accurate Simulation, SICE Journal of Control, Measurement, and System Integration, Vol. 9, No. 1, pp. 29, 2016.
4. 鈴木将義, 榊原一紀, 瀬尾昌孝, 西川郁子, 電力売買エージェント群による取引市場と電力ネットワークにおける最適融通, システム制御情報学会論文誌, Vol.29, No.2, pp.86-92, 2016.
5. 鈴木将義, 榊原一紀, 西川郁子, 電力融通ネットワークに対する線形計画モデルを用いた効率の解析と感度分析, 電気学会 電子・情報・システム部門誌, Vol.136, No.10, pp.1445-1453, 2016.

[学会発表] (計 17 件)

1. K. Sakakibara, T. Matsumoto, I. Taniguchi and H. Tamaki, A mathematical programming model for planning and utilization of decentralized energy

networks, ISCIE/ASME 2014 International Symposium on Flexible Automation (ISFA2014), 2014.7 (Awaji).

2. 中崎敏信, 榊原一紀, 松本卓也, 谷口一徹, 玉置久, 離島を対象とした分散型電力ネットワークの全体構成最適化, 平成 26 年 電気学会 電子・情報・システム部門大会, 2014.9 (松江).
3. 谷口一徹, 三浦博之, 松本卓也, 榊原一紀, 玉置久, 直流マイクログリッド運用のエージェント・シミュレーション・モデルー仮想実験による構成最適化に向けて, 計測自動制御学会 システム・情報部門学術講演会 2014 (SSI2014), 2014.11 (岡山).
4. 中崎敏信, 榊原一紀, 松本卓也, 谷口一徹, 玉置久, 離島を対象とした分散型電力ネットワークの数理最適化による全体構成最適化, 計測自動制御学会 システム・情報部門学術講演会 2014 (SSI2014), 2014.11 (岡山).
5. 榊原一紀, 松本卓也, 谷口一徹, 玉置久, 離島を対象とした分散型電力ネットワークの全体構成最適化, 第 5 回横幹連合総合シンポジウム, 2014.11 (東大).
6. K. Sakakibara, T. Matsumoto, I. Taniguchi and H. Tamaki, Optimization of design of decentralized energy networks by mathematical programming techniques, Joint 7th International Conference on Soft Computing and Intelligent Systems and 15th International Symposium on Advanced Intelligent Systems (SCIS & ISIS 2014), 2014.12.3-6 (Kitakyushu).
7. 三浦博之, 松本卓也, 玉置久, 榊原一紀, 谷口一徹, 直

流マイクログリッドシステムのシミュレーションモデル, 第 59 回システム制御情報学会研究発表講演会, 2015.5.20-22 (大阪).

8. 中崎敏信, 榊原一紀, 松本卓也, 谷口一徹, 玉置久, 沼島プロジェクト: 離島を対象とした分散型電力ネットワークの全体構成最適化, 電気学会システム研究会「システム技術一般」, 2015.6.20 (東京) (電気学会 電子・情報・システム部門 技術委員会奨励賞).
9. K. Sakakibara, T. Nakazaki, T. Matsumoto, I. Taniguchi and H. Tamaki, Analysis of decentralized energy systems by mathematical programming techniques, The 34th Chinese Control Conference and SICE Annual Conference 2015 (CCC&SICE2015), 2015.7.28-30 (Hangzhou).
10. 三浦博之, 松本卓也, 玉置久, 榊原一紀, 谷口一徹, A Simulation Model of DC Micro Grid System, 平成 27 年 電気学会 電子・情報・システム部門大会, 2015.8.26-29 (長崎).
11. 酒戸克浩, 谷口一徹, 榊原一紀, 福井正博, 自律分散型スマートグリッドにおける EV 導入を考慮した電力融通最適化手法, 計測自動制御学会 システム・情報部門学術講演会 2015 (SSI2015), 2015.11.18-20 (函館).
12. 三浦博之, 松本卓也, 玉置久, 榊原一紀, 谷口一徹, 超サイバー社会の構成・運用のための最適化モデル, 第 28 回自律分散システム・シンポジウム, 2016.1.21-22 (広島大).
13. 中崎敏信, 榊原一紀, 松本卓也, 谷口一徹, 玉置久, 沼島プロジェクト: 離島を対象とした分散型電力ネットワークの全体構成最適化, 2015 年システム研究会優秀論文講演会兼優秀論文発表賞 A 選考会, 2016.1.14 (東京).
14. 浦和哉, 立花潤三, 榊原一紀, 最適化モデルに基づく地方自治体における低炭素型エネルギーシステムの設計・評価, 平成 28 年 電気学会 電子・情報・システム部門大会, 2016.8.31-9.3 (神戸大).
15. K. Sakato, I. Taniguchi, K. Sakakibara, T. Matsumoto, H. Tamaki and M. Fukui, Optimal Power Distribution for Decentralized Electric Energy Network with Electric Vehicles, 21st IEEE International Conference on Emerging Technologies and Factory Automation (ETFA2016), 2016.9.6-9 (Berlin).
16. 佐藤優馬, 瀬尾昌孝, 榊原一紀, 西川郁子, 確率計画法を用いた HEMS における買電・蓄電スケジューリング, 平成 28 年電気関係学会関西連合大会, 2016.11.22-23 (大阪府立大学).
17. 山下寿希也, 酒戸克浩, 谷口一徹, 榊原一紀, 松本卓也, 福井正博, 分散型電力ネットワークの構成最適化の一検討, 計測自動制御学会 システム・情報部門学術講演会 2016 (SSI2016), 2016.12.6-8 (大津).

6 研究組織

(1) 研究代表者

榊原 一紀 (SAKAKIBARA, Kazutoshi)
富山県立大学・工学部・准教授
研究者番号: 30388110

(2) 研究分担者

松本 卓也 (MATSUMOTO, Takuya)
神戸大学・評価室・助教
研究者番号: 00625642

渡邊 真也 (WATANABE, Shinya)
室蘭工業大学・工学研究科・准教授
研究者番号: 30388136