

## 科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 28 年 5 月 30 日現在

機関番号：32612

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2013～2015

課題番号：25420450

研究課題名(和文) スマートエネルギーシステムにおける分散型市場機能によるネットワーク最適化

研究課題名(英文) Distributed optimization of networks in smart energy systems by using market mechanism

研究代表者

相吉 英太郎 (Aiyoshi, Eitaro)

慶應義塾大学・理工学部・教授

研究者番号：90137985

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 4,000,000円

研究成果の概要(和文)： スマートコミュニティを念頭に置いた複数種類のエネルギー源の需給バランスを記述するエネルギーフローのネットワークのモデル化・その最適化問題の定式化および最適化手法を提案した。とくに貯蔵施設を表す蓄積節点や、エネルギーの売買をおこなう市場をモデル化した市場節点を設けた点が新規な点である。さらに、エネルギー変換が非線形特性を有する場合を考慮し、凸性の仮定がない場合でも、市場における価格調整によって、最適化問題を分割することができる新しい分散型最適化手法として、拡大ラグランジュ関数を用いることを提案し、その有効性を具体的なエネルギーフローにおいて確認した。

研究成果の概要(英文)： Considering smart cities, we proposed network flow models with balancing supply and demand between plural energy sources, formulations of optimizations of the network flow problems, and their optimization methods. In these model, storage nodes describing buffer facilities and market nodes modelling markets where energies are trading are introduced newly.

Next the original fruit in case where convex assumption is not supposed with non-linearity characteristics in energy transformation, the new distributed optimization method is proposed, in which a total optimization problem is decomposed by the price coordination in market by using the augmented Lagrangian. Moreover, effectiveness of the new method to the above energy network flow models is certified.

研究分野：システム最適化

 キーワード：分散型最適化 エネルギーフロー ネットワーク最適化 分割解法 価格調整 拡大ラグランジュ関数  
スマートシティ

1. 研究開始当初の背景

地域全体の低炭素化・エネルギー消費の最小化を目的とした様々な試みが、理論研究および実証研究を含めて検討されていたが、システム科学・システム工学の技法や技術が十分に駆使されているとは言い難い状況が、研究開始当初に指摘されていた。とくに、複数種類のエネルギー源を融通する「スマートシティ」や「スマートコミュニティ」の構想においても、たとえば図1のような概念図でそのモデルを記述することがあっても、システム科学やシステム工学の技法を適用するためのモデル化が不十分であった。

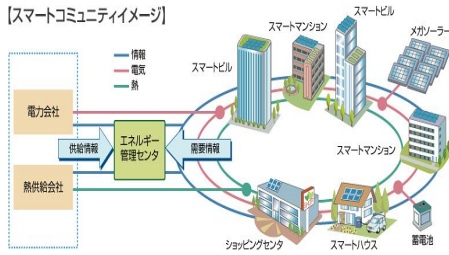


図1.スマートシティの概念図

また、エネルギー資源の配分計画に分散的最適化手法が用いられる研究が多いが、凸性の仮定を必要とする古典的なラグランジュ関数法の適用が議論されるに留まっていたため、その手法の適用範囲が限定されており、エネルギー変換に非線形性が存在する場合や目的関数が凸関数でない場合には適用不可能であるという課題があった。

2. 研究の目的

複数種類のエネルギー源を融通するスマートシティのモデルとして、複数種類のエネルギーフローが変換要素を通して相互に連結したネットワークモデルを導入し、各エネルギーの部分ネットワークを管理する主体間の整合をとる要素として「市場」を導入し、このネットワークモデル上のエネルギーフローを分散的に調整・制御する手法を確立することを課題目的とする。

具体的には、電力圏・ガス圏・上水処理圏・熱蒸気圏の部分ネットワークが分散的に結合したネットワークモデルを想定し、それらの「圏」ごとに管理主体が存在することを想定し、それらの間に市場節点を導入し、価格調整によって分散的に最適化をおこなうための計算手法を確立する。とくに、エネルギーの売買における市場の均衡価格を決定するための最適化手法として、それに適したヒューリスティックな新たな最適化手法も開発する。

さらにガスタンクや蓄熱槽などの蓄積要素の存在も想定し、エネルギーフローがダイナミクスを有する場合において、市場を介してエネルギーの需給調整をおこなう計算論的方法論を確立する。

3. 研究の方法

研究代表者の相吉は、エネルギーフローネットワークにおけるエネルギー種類ごとに分散的に最適化をおこなう場合、市場節点で分割する手法を開発し、価格調整問題を解くヒューリスティックな最適化手法の開発、また需要変動に対してロバスト性を有する最適化問題を解くヒューリスティックな最適化手法の開発を、研究分担者の安田は、具体的なエネルギー運用のための実システムにおける制御戦略の開発を担当しておこなった。とくに前者では、まずネットワークに蓄積要素がない場合の静的な場合について、理論と計算手法を開発し、さらに蓄積要素を有する動的なネットワークへと、これら理論と手法を拡張する。動的な場合では、前述の成果を一定期間の需要を予測しながら最適な市場価格を動的に求める手法へと展開する。

4. 研究成果

スマートシティにおける複数種類のエネルギー源の融通を、たとえば図2のような変換節点を有するエネルギーフローのネットワークとしてモデル化し、各エネルギーの部分ネットワークを管理する主体が複数分散的に存在する場合を想定し、それらの主体が分散的に最適化をおこなう手法を開発した。また、ガスタービンによってガスを電力に変換する場合、たとえば図3のようにガスタービンの前後に市場節点を設けて、ここでネットワークを分割することで電力側の最適化とガス側の最適化を分散的におこなうモデルを提案した。

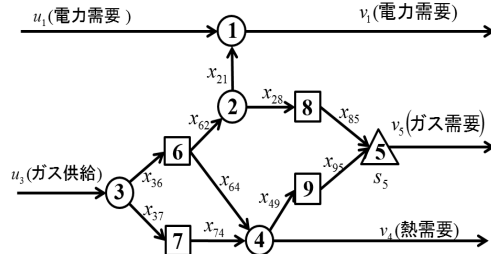


図2. エネルギーフローネットワーク

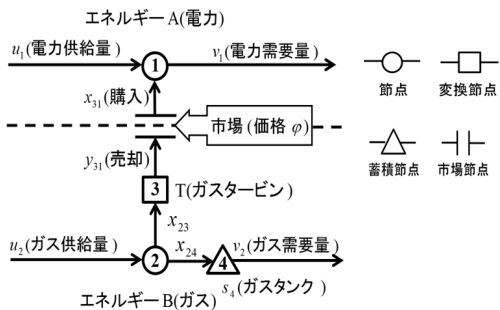


図3. 変換器の前後に導入された市場節点

市場節点でのネットワーク最適化問題の分割は、以下のようにして行われる。ある市場  $m$  での購入量を  $x_m$ 、売却量を  $y_m$  としたとき、市場での売買成立の等式制約条件のもと

での動的ネットワーク最適化問題が

$$\min_{\mathbf{u}(\cdot), \mathbf{s}(\cdot)} \sum_{t=1}^T F(\mathbf{u}(t), \mathbf{s}(t), \mathbf{x}(t), x_m(t), y_m(t); \mathbf{v}(t))$$

subj. to  $x_m(t) = y_m(t), t=1, \dots, T$

と定式化されるものとする。ここで、 $\mathbf{u}$  はエネルギー供給量、 $\mathbf{v}$  はエネルギー需要量、 $\mathbf{s}$  は蓄積要素の状態量、 $\mathbf{x}$  はネットワークのアーキを流れるエネルギー量である。目的関数  $F$  が市場の購入側と売却側とに

$$\begin{aligned} F(\mathbf{u}(t), \mathbf{s}(t), \mathbf{x}(t), x_m(t), y_m(t); \mathbf{v}(t)) \\ = F_1(\mathbf{u}_1(t), s_1(t), \mathbf{x}_1(t), x_m(t); \mathbf{v}_1(t)) \\ + F_2(\mathbf{u}_2(t), s_2(t), \mathbf{x}_2(t), y_m(t); \mathbf{v}_2(t)) \end{aligned}$$

と加算的に分離可能で、ガスタービンの変換特性に非線形性が有する場合の分散型最適化手法として、凸性の仮定を必要とするラグランジュ関数法に代わり、拡大ラグランジュ関数

$$\begin{aligned} M(\mathbf{u}(t), \mathbf{s}(t), \mathbf{x}(t), x_m(t), y_m(t), \varphi(t), r; \mathbf{v}(t)) \\ = F(\mathbf{u}(t), \mathbf{s}(t), \mathbf{x}(t), x_m(t), y_m(t); \mathbf{v}(t)) \\ + \varphi(t)(x_m(t) - y_m(t)) + r(x_m(t) - y_m(t))^2 \end{aligned}$$

を用いた分割解法を提案した。具体的には、二つの部分拡大ラグランジュ関数

$$\begin{aligned} M_1(\mathbf{u}_1(t), s_1(t), \mathbf{x}_1(t), x_m(t), y_m(t), \varphi(t), r; \mathbf{v}_1(t)) \\ = F_1(\mathbf{u}_1(t), s_1(t), \mathbf{x}_1(t), x_m(t); \mathbf{v}_1(t)) \\ + \varphi(t)x_m(t) + r(x_m(t) - y_m(t))^2 \\ M_2(\mathbf{u}_2(t), s_2(t), \mathbf{x}_2(t), x_m(t), y_m(t), \varphi(t), r; \mathbf{v}_2(t)) \\ = F_2(\mathbf{u}_2(t), s_2(t), \mathbf{x}_2(t), y_m(t); \mathbf{v}_2(t)) \\ - \varphi(t)y_m(t) + r(x_m(t) - y_m(t))^2 \end{aligned}$$

に分割し、購入側は  $y_m(\cdot)$  が与えられたもとで

$\min M_1(\mathbf{u}_1(t), s_1(t), \mathbf{x}_1(t), x_m(t), y_m(t), \varphi(t), r; \mathbf{v}_1(t))$  を、売却側は  $x_m(\cdot)$  が与えられたもとで  $\min M_2(\mathbf{u}_2(t), s_2(t), \mathbf{x}_2(t), x_m(t), y_m(t), \varphi(t), r; \mathbf{v}_2(t))$  を解くゲーム問題の Nash 均衡解を与える購入量  $x_m^N(\varphi, t)$  と売却量  $y_m^N(\varphi, t)$  を求め、 $x_m^N(\varphi, t) = y_m^N(\varphi, t)$

を満たす価格  $\varphi$  を市場の取引価格とする手法で、代替の取引価格決定問題

$$\min_{\varphi} |x_m^N(\varphi, t) - y_m^N(\varphi, t)|$$

を、ヒューリスティック最適化手法で解くという方法である。

具体的かつ簡単な図3に対するシミュレーション例題

$$\min_{(u_1, u_2, s_4)} \sum_{t=1}^T [f_1(u_1(t)) + f_2(u_2(t)) + f_4(s_4(t))]$$

$$\text{subj. to } x_{31}(t) = y_{31}(t)$$

$$u_1(t) + x_{31}(t) = v_1(t)$$

$$u_2(t) = x_{23}(t) + x_{24}(t)$$

$$s_4(t) = s_4(t-1) + x_{24}(t) - v_2(t)$$

$$y_{31}(t) = h_3(x_{23}(t))$$

(all variables)  $\geq 0$

where  $v_1(t), v_2(t), s_4(0)$ ; given

$$t = 1, \dots, T$$

において、

$$\begin{aligned} f_1(u_1) &= u_1^2, f_2(u_2) = 0.5u_2^2, f_4(s_4) = 0.01s_4^2, \\ h_3(x_{23}) &= 0.5(x_{23})^2, T = 24 \end{aligned}$$

とし、需要予測の時系列  $v_1, v_2$  を図4のように設定した場合で、拡大ラグランジュ関数法を用いた Nash 均衡解が与える取引価格決定問題をヒューリスティック最適化手法で解いた結果、図5のような(a)最適な供給量・蓄積量時系列と(b)最適な価格・取引量の時系列の正しい解を得ることができ、提案手法の有用性を確認することができた。なお、古典的なラグランジュ関数法を用いた分割解法では、このような正しい時系列を得ることは、変換関数  $h_3(x_{23})$  の非線形性のため不可能である。

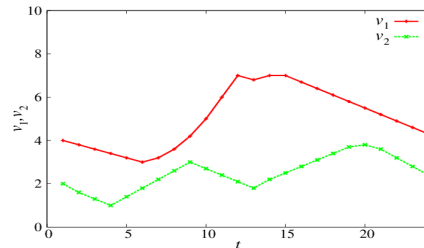
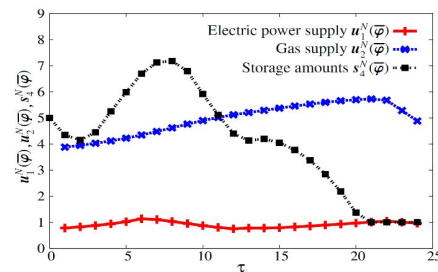
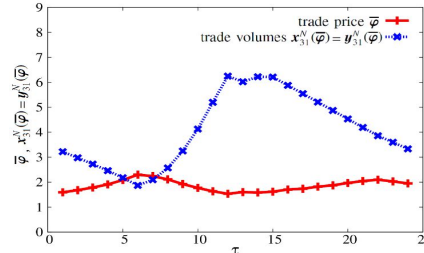


図4. 需要予測の時系列



(a) 最適な供給量・蓄積量時系列



(b) 最適な価格と取引量の時系列

図5. 得られた最適時系列

なお、上記の成果はおもに学会発表の(1)の内容であるが、計測自動制御学会システム・情報部門学術講演会 2015(SSI2015)の最優秀論文賞として評価され、現在同学会英文論文集(JCMSI)に投稿中(査読中)である。

## 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3件)

(1) Y. Koguma, E. Aiyoshi : A New

Frameworks with a Stability Theory for Multipoint-type and Stochastic Meta-heuristic Optimization Algorithms, IEICE Trans. on Fundamentals, Communications and Computer Sciences (査読有), Vol.E98-A, p.p.700-709 (2015)

- (2) M. Kanemasa, E. Aiyoshi: Algorithm tuner for PSO Methods and Genetic Programming Technique for Learning Tuning Rules, IEEJ Trans. on Electrical Electronics Engineering (査読有), Vol. 9, p.p.407-414 (2014)
- (3) 大矢俊介, 田村健一, 安田恵一郎: MMSとDPに基づく分散型エネルギーシステムの協調型需給制御, 電気学会論文誌B(電力・エネルギー部門誌) (査読有), 134巻, p.p.273-274 (2013年)

[学会発表](計11件)

- (1) 小坂寛之, 相吉英太郎: 拡大ラグランジュ関数法を用いた価格調整によるエネルギーネットワークの分散型最適化, 計測自動制御学会 システム・情報部門学術講演会 2015, 2015年11月18日~20日, 函館アリーナ(北海道・函館市)
- (2) T. Sawairi, K. Tamura, K. Yasuda: A Smart Strategy for Supply-Demand Control for Distributed Energy Systems, 2015 IEEE International Conf. on Systems, Man and Cybernetics, Oct. 05~10 2015, Hong Kong (China)
- (3) T. Sawairi, K. Tamura, K. Yasuda: A Study on Supply-Demand Control Strategy for Distributed Energy Systems, 2015 IEEE International Conf. on Systems, Man and Cybernetics, Oct. 05~10 2015, Hong Kong (China)
- (4) 今野高明, 相吉英太郎: 等式制約ロバスト最適化問題のヒューリスティック解法と需要変動を考慮したエネルギー流れ最適化問題への応用, 計測自動制御学会 システム・情報部門学術講演会 2014, 2014年11月21日~23日, 岡山大学(岡山県・岡山市)
- (5) 前田竜二, 相吉英太郎: 拡大ラグランジュ関数法による最適化問題の新分割解法とエネルギー流れ最適化問題への応用, 計測自動制御学会 システム・情報部門学術講演会 2014, 2014年11月21日~23日, 岡山大学(岡山県・岡山市)
- (6) 澤入智己, 田村健一, 安田恵一郎: 分散型エネルギーシステムの運用・制御戦略, 計測自動制御学会 システム・情報部門学術講演会 2014, 2014年11月21日~23日, 岡山大学(岡山県・岡山市)
- (7) 佐々木康道, 相吉英太郎: 最適化問題の「チーム化」とそれに基づくハイブリッ

ド型最適化手法の提案, 平成26年電気学会 電子・情報システム部門大会, 2014年9月03日~06日, 島根大学(島根県・松江市)

- (8) 澤入智己, 田村健一, 安田恵一郎: 分散型エネルギーシステムにおける協調型需給制御の有用性に関する検討, 平成26年電気学会 電子・情報システム部門大会, 2014年9月03日~06日, 島根大学(島根県・松江市)
- (9) 相吉英太郎: エネルギーフローのネットワークモデルとその分散的最適運用のための市場ネットワークモデル, 平成26年電気学会全国大会, 2014年3月18日~20日, 愛媛大学(愛媛県・松山市)
- (10) 安田恵一郎: 総論: スマートコミュニティの考え方とモデル, 平成26年電気学会全国大会, 2014年3月18日~20日, 愛媛大学(愛媛県・松山市)
- (11) 相吉英太郎: スマートコミュニティのためのエネルギーフローネットワークと市場ネットワーク, 第23回インテリジェント・システム・シンポジウム(FAN シンポジウム), 2013年09月25日~26日, 九州大学(福岡県・福岡市)

[図書](計1件)

- (1) 相吉英太郎, 岡本卓, 安田恵一郎, 森北出版: 最適化手法の基礎 - 力学モデルによる理解と実装 - (2014) 206ページ

## 6. 研究組織

### (1) 研究代表者

相吉 英太郎 (AIYOSHI, Eitaro)  
慶應義塾大学・理工学部・教授  
研究者番号: 90137985

### (2) 研究分担者

安田 恵一郎 (YASUDA, Keiichiro)  
首都大学東京・理工学研究科・教授  
研究者番号: 30220148