

平成 30 年 5 月 24 日現在

機関番号：15501

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2014～2017

課題番号：26420420

研究課題名(和文) 家庭用エネルギー管理システムのための最適制御技術の開発

研究課題名(英文) Development of Optimization and Control Methods for Home Energy Management Systems

研究代表者

若佐 裕治 (WAKASA, Yuji)

山口大学・大学院創成科学研究科・准教授

研究者番号：60263620

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,400,000円

研究成果の概要(和文)：本研究では、再生可能エネルギーによる電力供給の不安定性を家庭用エネルギー管理システムで補償するための最適化技術と制御技術の開発を行った。とくに、稼働するまでに時間的猶予がある電気製品に注目し、その時間的自由度を有効活用する最適制御法を提案した。また、平均合意アルゴリズムを併用した分散型粒子群最適化アルゴリズムを提案し、その収束性条件を与えた。さらに、家庭用エネルギー管理システムにおける太陽光発電との連携を考慮して、粒子群最適化による太陽光発電システムの最大電力点追従制御の効率向上法を提案した。

研究成果の概要(英文)：In this study, we have developed optimization and control methods for demand-side home energy management systems in order to compensating for instability of power supply due to renewable energy. In particular, focusing on deferrable loads of electric appliances at home, we have proposed optimal control methods for utilizing the flexibility of such electric appliances. We have also proposed a general-purpose distributed particle swarm optimization algorithm by combining with an average consensus algorithm, and have provided a convergence condition. Moreover, we have proposed a maximum power point tracking control method for photovoltaic systems by improving the efficiency of a particle swarm optimization-based approach.

研究分野：制御・システム工学

キーワード：エネルギーマネジメント 最適化 制御工学

1. 研究開始当初の背景

安定的かつ効率的なエネルギーの利用を目指して、スマートグリッドをキーワードに多くの事業が促進され、さまざまな角度から研究が進められている。スマートグリッドの中でも特に、電気自動車を含む電気製品のエネルギー管理を行うシステムは、家庭用エネルギー管理システム (Home Energy Management System: 以下 HEMS と略記) と呼ばれる。HEMS のためのスマートメータの導入が各家庭に促進されているが、現状では家電の消費電力を可視化 (見える化) する機能が主体であり、双方向の情報通信技術を利用して高度なエネルギー管理を行うシステムには至っていない。

一方で、近い将来、太陽光、風力、潮力などの再生可能エネルギーを積極的に利用することが計画されているが、これらは気象条件により安定供給が難しい。したがって、電力系統への送電電力の急激な変動への対応が重要な課題となってくる。また、電力需要の方に目を向ければ、電気自動車の普及により、それらの全体としての効率的な充電スケジュールが必要となってくる。さらに、電気製品の中でも、洗濯機、乾燥機、食洗機、炊飯器などはすぐに稼働する必要はなく、指定した時刻までに処理を終えればよいという使用が可能である。こうした時間的自由度がある電気製品の効率的な運用も課題である。

このような背景から、電力網全体における電力需給バランスを考慮して、多くの家庭の電気製品の消費電力を最適に制御する技術が研究されている。とくに、情報を集約する計算センターが集中計算する方法ではなく、各家庭の計算資源と通信環境を利用し、分散的に計算する方法のニーズが高まっていた。

2. 研究の目的

本研究は、再生可能エネルギーによる電力供給の不安定性を HEMS で補償するための最適化技術と制御技術の開発を行うことを目的とする。また、関連する分散型最適化手法と太陽光発電システムの制御法の開発を行う。具体的には以下のような課題に取り組む。

- (1) 適用可能な電気製品の対象の拡大を図る。
- (2) 各家庭からの電気製品のスケジュールのリクエストの変更に柔軟に対応可能な方法を構築する。
- (3) 凸近似が不要で、非凸の制約を扱える電気製品スケジュールのための最適化手法を検討する。
- (4) 分散型の最適化アルゴリズムを新たに開発するとともに、その収束性を解析する。
- (5) HEMS に連携する太陽光発電システムの効率向上を目的とした最大電力点追従制御法を提案する。

3. 研究の方法

- (1) 稼働するまでに時間的猶予がある電気製品のスケジュールリング問題が先行研究において検討されている。しかし、その定式化では、対象となる洗濯機、乾燥機、食洗機などの電気製品の消費電力パターンが固定されている状況を想定していた。そのため、今後普及が予想される電気自動車の充電器のように消費電力パターンが固定されていない電気製品を扱うことができない。対象とする電気製品の範囲を広げ、消費電力パターンが固定されていない電気製品を扱えるスケジュールリング問題を定式化する。
- (2) 複数の家庭からの電気製品スケジュールリングのリクエストを受けて、電力小売業者が該当日前日までに、1 日単位で電気製品をスケジュールする電力網を想定する。しかし、当日予定外の変更が生じた場合、当初予定した需給バランスが劣化し、不必要な供給調整を行う必要が生じる。そのような問題に対応するため、スケジュールリングアルゴリズムにモデル予測制御の方法を導入する。
- (3) 電気製品スケジュールリング問題を凸最適化問題として定式化できれば、主双対摂動法などの分散型解法が適用できる。しかし、電気製品スケジュールリング問題は、一般には非凸最適化問題であり、これを凸最適化問題に近似する労力や近似による精度劣化の問題がある。そこで、非凸最適化問題に対応できる大域的解法である粒子群最適化に注目し、平均合意アルゴリズムを併用した分散型アルゴリズムを提案する。
- (4) 電気製品スケジュールリング問題に限定しない、より一般的な分散型粒子群最適化アルゴリズムを開発する。平均合意アルゴリズムを併用することにより、本来集中型の解法である粒子群最適化を分散型の解法とすることが可能となる。また、アルゴリズムの振る舞いを解析し、とくに、ある種の収束性を保証するための条件を理論的に明らかにする。
- (5) 太陽光発電システムには、時々刻々と変化する日射量や、太陽光パネルの部分陰に適應して、最大電力点へ追従するための制御法が求められている。粒子群最適化を適用した先行研究では、急激な変化には対応できるが、緩やかな変化に対しては最大電力点への追従が不十分となり、発電効率が低下する問題があった。そこで、粒子群最適化の構成と適用条件を改良し、緩やかな変化にも対応できる制御法を開発する。

4. 研究成果

上記の研究目的、および研究方法の各項目

に対して、つぎのような研究成果を得た。

- (1) 高速な分散型解法である主双対摂動法の適用範囲内で、電気自動車のような消費電力パターンが固定されていない電気製品を定式化した。これにより、凸最適化問題の特性を維持したまま、スケジューリング対象となる電気製品の適用範囲を拡大することが可能となった。この結果を雑誌論文[7]において発表した。
- (2) モデル予測制御の方法を導入した電気製品スケジューリング法を提案した。これによって、リクエスト変更による需給バランスの劣化を抑えることが可能となることをシミュレーションを通して検証した。この結果を雑誌論文[4]において発表した。
- (3) 分散型粒子群最適化による電気製品スケジューリング法を開発した。また、電気自動車の充電だけでなく、放電による家庭内電気製品への電力供給を可能にする定式化を行い、より柔軟に電力需給バランス維持に貢献する方法を発表した(学会発表[1, 4, 6, 9])。
- (4) 平均合意アルゴリズムを併用した、一般的な分散型粒子群最適化アルゴリズムを考案し、その収束性の条件を与えた。このアルゴリズムにより、粒子群最適化の簡便さと非凸最適化問題への求解性能の特長を維持しつつ、一定の条件による保証の下で、分散的な計算環境における非凸最適化問題の求解が可能となった。この結果を学会発表[8, 12]、雑誌論文[8]において公表した。
- (5) 粒子群最適化の構成と適用条件を改良した太陽光発電システムのための最大電力点追従制御法を提案した。シミュレーションによるいくつかの既存法との比較を通して、提案法では発電効率が向上することを示した。この結果を雑誌論文[1]において発表した。

上記の主な研究成果だけでなく、それらに関連する研究も含め、雑誌論文9件、学会発表12件の成果発表を行った。また、学生による3件の学会発表[4, 7, 9]では、いずれも奨励賞を受賞し、高い評価を得ることができた。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕(計9件)

- [1] 志賀大輔, 若佐裕治, 中村 龍, 緩やかな変化を考慮した粒子群最適化による太陽光発電システムの最大電力点追従制御, システム制御情報学会論文誌, vol. 31, no. 6, 2018 (掲載予定). 査読有.

- [2] Yuji Wakasa and Tomoki Kuwabara, Simultaneous tuning of controller and compensator parameters for systems with backlash, Innovative Computing, Information and Control Express Letters, vol. 11, no. 3, pp. 559-564, 2017. 査読有.
 - [3] Yuji Wakasa and Shojiro Adachi, Controller parameter tuning for DC motor systems with friction, Proc. SICE Annual Conference 2016, pp. 575-577, 2016. 査読有.
 - [4] 若佐裕治, 仲谷聡介, 主双対摂動法に基づく分散最適化による電力負荷スケジューリング, システム制御情報学会論文誌, vol. 29, no. 6, pp. 250-257, 2016. 査読有.
 - [5] Yuji Wakasa and Shojiro Adachi, Fictitious reference iterative tuning considering input saturation, IEEJ Trans. Electrical and Electronic Engineering, vol. 10, no. S1, pp. S159-S161, 2015. DOI:10.1002/tee.22177. 査読有.
 - [6] Yuji Wakasa and Sho Yamasaki, Distributed particle swarm optimization based on primal-dual decomposition architectures, Proc. 46th ISCTE International Symposium on Stochastic Systems Theory and Its Applications, pp. 97-101, 2015. 査読有.
 - [7] Yuji Wakasa, Sosuke Nakaya, and Sho Yamasaki, Scheduling of flexible electric power loads via a distributed optimization algorithm, Proc. SICE Annual Conference 2015, pp. 1110-1114, 2015. 査読有.
 - [8] Yuji Wakasa and Sosuke Nakaya, Distributed particle swarm optimization using an average consensus algorithm, Proc. 54th IEEE Conference on Decision and Control, pp. 2661-2666, 2015. 査読有.
 - [9] 山崎 翔, 若佐裕治, 縮約データによるHEVの燃費最適化の計算時間短縮, 計測自動制御学会論文集, vol. 51, no. 2, pp. 136-138, 2015. 査読有.
- 〔学会発表〕(計12件)
- [1] 和泉圭祐, 志賀大輔, 仲谷聡介, 若佐裕治, 分散型PSOによる電気自動車の充

放電を考慮した電気製品スケジューリング, 平成 29 年度 (第 68 回) 電気・情報関連学会中国支部連合大会, 2017.10.21, 岡山理科大学 (岡山県岡山市)

- [2] 山本展行, 若佐裕治, 多層ニューラルネットワークに基づく非線形補償と制御器調整, 第 4 回計測自動制御学会制御部門マルチシンポジウム, 2017.3.8, 岡山大学 (岡山県岡山市)
- [3] 山本展行, 若佐裕治, 多層ニューラルネットワークによる非線形補償を用いた制御器パラメータ調整法, 第 25 回計測自動制御学会中国支部学術講演会, 2016.11.26, 広島大学 (広島県東広島市)
- [4] 志賀大輔, 仲谷聡介, 若佐裕治, 分散型 PSO による電気製品スケジューリング, 平成 28 年度 (第 67 回) 電気・情報関連学会中国支部連合大会, 2016.10.22, 広島大学 (広島県東広島市)
- [5] (招待講演) 若佐裕治, 粒子群最適化の解析と分散型アルゴリズムへの展開, 計測自動制御学会九州支部「制御理論とその応用に関する研究委員会」研究会 (RACOT 研究会), 2016.6.25, アクロス福岡 (福岡県福岡市)
- [6] 若佐裕治, 仲谷聡介, 志賀大輔, 分散型 PSO アルゴリズムによる電気製品スケジューリング, 第 3 回計測自動制御学会制御部門マルチシンポジウム, 2016.3.9, 南山大学 (愛知県名古屋市)
- [7] 桑原智生, 若佐裕治, バックラッシュを考慮した制御器パラメータ調整法, 第 24 回計測自動制御学会中国支部学術講演会, 2015.11.28, 岡山理科大学 (岡山県岡山市)
- [8] 若佐裕治, 仲谷聡介, PSO と平均合意に基づく分散型最適化アルゴリズム, 第 58 回自動制御連合講演会, 2015.11.15, 神戸大学 (兵庫県神戸市)
- [9] 仲谷聡介, 若佐裕治, PSO による電気製品スケジューリング, 平成 27 年度 (第 66 回) 電気・情報関連学会中国支部連合大会, 2015.10.17, 山口大学 (山口県宇部市)
- [10] 中村 龍, 若佐裕治, HEV の燃費最適化に対する Firefly Algorithm の適用, 平成 27 年度 (第 66 回) 電気・情報関連学会中国支部連合大会, 2015.10.17, 山口大学 (山口県宇部市)

[11] 若佐裕治, 仲谷聡介, 山崎翔, 分散最適化アルゴリズムによる電力負荷スケジューリング, 第 59 回システム制御情報学会研究発表講演会, 2015.5.20, 中央電気倶楽部 (大阪府大阪市)

[12] 若佐裕治, 平均合意アルゴリズムを用いた分散型粒子群最適化, 第 2 回計測自動制御学会制御部門マルチシンポジウム, 2015.3.7, 東京電機大学 (東京都足立区)

6. 研究組織

(1) 研究代表者

若佐 裕治 (WAKASA, Yuji)

山口大学・大学院創成科学研究科・准教授
研究者番号: 60263620