

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 28 年 6 月 8 日現在

機関番号：13302

研究種目：挑戦的萌芽研究

研究期間：2013～2015

課題番号：25540145

研究課題名(和文)電力の地産地消を実現する電力スケジューリングの解明

研究課題名(英文)Electric power scheduling of local consumption for local production

研究代表者

井口 寧 (INOUCHI, Yasushi)

北陸先端科学技術大学院大学・情報社会基盤研究センター・教授

研究者番号：90293406

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 2,900,000円

研究成果の概要(和文)：本研究では、再生可能エネルギーを電力として効率的に利用するため必要となる、超分散化された発電拠点や負荷機器の運転スケジューリングの問題に対し、分散型計算機システムのタスクスケジューリング手法を電力制御に適用し、地域内での発電と消費をバランスさせるための、マイクログリッド向けの能動的な制御スキームを解明した。

小規模な太陽光発電の発電量などを実際に測定評価するシステムを構築し、発電量の予測を行うアルゴリズムを検討した。その結果、天気予報によって予測アルゴリズムを変化させることによって、電力利用率を向上させることに成功した。本研究は情報処理学会 北陸支部 優秀論文発表賞を受賞した。

研究成果の概要(英文)：This research develops an electric power control scheme for natural energy such as electric power generated by solar panel. Adopting load estimation method for a computer system for estimation of electric power generated by solar panel, we can improve effectiveness of the use of natural energy.

A small prototype system was built to evaluate an estimation algorithm. The prototype system estimates the amount of electric power by solar panel using not only estimation scheme for load of computer system but weather forecast. We can improve the accuracy of electric power generation by solar panel switching several estimation algorithms by weather forecast. This research has received a commendation as an excellent presentation award from Information Processing Society Japan, Hokuriku branch.

研究分野：並列分散処理

キーワード：太陽光 自然エネルギー 負荷予測 スケジューリング 天気予報 計算基盤

1. 研究開始当初の背景

計算機システムでは、多数の計算資源に対して効率良くタスクを割り当てるためのタスクスケジューリングが研究され、多くの成果を上げてきた。タスクスケジューリングでは、(1) 計算機システムの運転状況によって、利用可能な計算機資源が変動する点、(2) それぞれのタスクにデッドラインが設けられ、デッドラインまでに各タスクを完了するようにスケジューリングする点、および (3) タスクに優先順位が割り当てられ、デッドラインを順守するように優先順位別スケジューリングを行う点、などの特徴がある。

一方、自然エネルギーによる電力供給では、(1) 天候や需要の変動によって、利用可能な電力量が変動する点、(2) 機器の中には、例えば PHV の充電など、利便性を損なわずに電力需要を時間的にシフト可能な機器がある点、および (3) 電力需要には優先順位を設けることも可能な点 (例えば PHV 充電の優先順位は高いが、空調の温度の若干の上下は低い優先順位で許容可能) という、計算機システムに類似した特性がある。そこで、これまでの計算機システム向けタスクスケジューリングを電力制御に適用しようというのが本提案の着想である。

2. 研究の目的

図 1 に本提案で想定するエネルギーシステムのイメージを示す。将来的には、太陽光や風力など再生可能エネルギーによる発電が普及すると考えられる。これらの再生可能エネルギーによる発電は、気象状況等によって刻一刻と状況が変化したが、電力は蓄積が不可能であり、逆流などの問題を避けるため、地域内で発電量に消費量を追従させる必要がある。一方で、負荷となる電化機器の中には、例えばプラグインハイブリッド車(PHV)では翌日の通勤時間までに充電が完了していれば良く、給湯ポットでは夕食の準備までに湯が沸いていれば要求は満足される。そこで刻々と変動する再生可能エネルギーによる発電と各家庭の電化機器の運転状態をモニタリング・予測しながら、発電量に見合った電力消費となるように、電化機器の運転をスケジューリングし、地域内で発電と電力消費をバランスさせるマイクログリッドのための電力を制御するための仕組みを解明しようというのが本提案の大きな目的である。さて、このような制約条件下でのスケジューリング問題は、計算機システムにおけるタスクスケジューリングに類似していることに気づく。計算機システムでのタスクスケジューリングは古くから研究がなされ、近年では (1) グリッドやクラウドなどの分散協調型タスクスケジューリング、(2) 組み込み機器向けの、一定時刻までに処理を完了させるリアルタイム・タスクスケジューリング、および

(3) 携帯機器向けの低消費電力型スケジューリング手法などが成果を上げ、機器の効率化に役立っている。これらの分散協調型、リアルタイム型、低消費電力型のスケジューリングは、まさしく分散協調型の電力管理で求められていることに酷似している。そこで、計算機システムでのスケジューリング手法の知見を電力管理に応用し、効率的な電力スケジューリング基盤を確立しようというのが本研究の基本的な試みである。

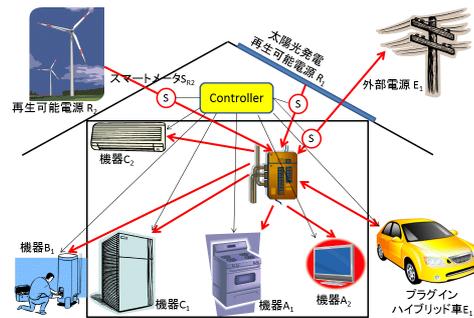


図 1 本研究で想定するエネルギーシステムのイメージ図

3. 研究の方法

最初に図 2 (A) 再生可能エネルギーの発電シミュレータを構成する。サーバにエージェント(シミュレーションのためのプロセス)を設け、過去の日照や風力などのデータから発電量の時間変動を模擬する。複数のエージェントを同時に実行させ、マルチエージェント方式でシミュレーション環境を構築する。過去の気象データは、気象庁などの Web から入手可能であるので、これを用いて時間ごとの発電量を推定する。実際に小規模な太陽光発電の発電量などを実際に測定評価するシステムを構築し、発電量の予測を行うアルゴリズムを評価する。

第二に、負荷側のシミュレータとして、(B) 負荷シミュレータを作成する。PHV やエアコン、電気ポットなどの電力消費を模擬し、応答として利得を返す。ここでは将来の情報家電に実装されるべき機能を検証することも行う。発電シミュレータと同様に、マルチエージェント方式で構成し、機器の独立性を担保しながらシミュレーション環境の大規模化にも対応可能とする。

電力監視・スケジューラを構築する。電力を監視し、負荷の制御やスケジューリングを行うスキームを構成し、そのアルゴリズムを明らかにする。ここで求められる機能として、超分散の数万～数十万からの機器から刻々と得られる電力情報から個々の機器ごとの相関や時間・天候との相関を計算し、負荷傾向を予測する方法、および時間的・エネルギー的制約条件を満たしながら、電力消費のスケジュールを計算し、機器の運転を指示する機能である。この結果は負荷機器シミュレ

夕に返され、機器の電力制約の変動に対する振る舞いを検証する。既存のグリッド・クラウド計算機向けのリアルタイム・タスクスケジューリング手法を電力スケジューリング向けに改良し、アルゴリズムを開発する。

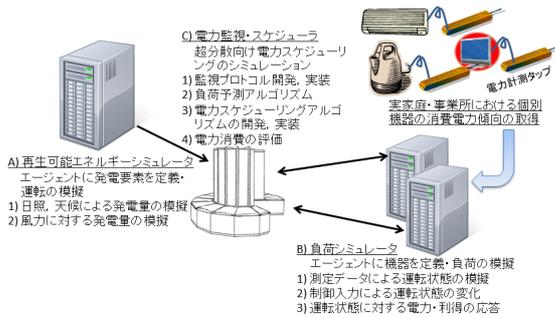


図 2 本提案の実施イメージと構築するシミュレーションシステム

4. 研究成果

次に、本研究の中核となる電力スケジューリング方式について述べる。この成果は、電気関連学会北陸支部連合大会にて、情報処理学会北陸支部 優秀論文発表賞を受賞したものである。

近年、エネルギー需要量の増大、災害問題、環境問題の関心から、分散型電源が目目されている。分散型電源とは、地域でクリーン発電によって電力を産出し、地域で電力を消費するという考え方のことをいう。エネルギーを地産地消することで、様々なメリットが得られる。しかし、再生可能エネルギーは時間や天候などに影響され供給量が安定しないという問題がある。そこで本研究では、電力をリアルタイムにスケジューリングすることによって、供給特性と需要特性を適合し、再生可能エネルギーの利用効率を高め、総消費外部電力量(火力発電などの大規模な発電から供給される電力)の削減を目指す。電力スケジューリングに関する先行研究には、電力コストの低減化、消費電力のピークカットに焦点を当てた研究が多い。本研究では、総消費外部電力量の削減に注力する。

電力スケジューリング

電力スケジューリングとは、電気機器のタスクのスケジューリングを行うことを指す。また、再生可能エネルギーは、時間によって変動するため、電力スケジューリングにはリアルタイム性が求められる。本研究では、計算機のタスクスケジューリングを電力スケジューリングへ応用する。

電気機器のタスクとは、デッドラインが存在するタスクのことを指す。表 1 に電気機器のタスクの種類、図 3 に電気器のタスククラス概念図を示す。

計算機のタスクスケジューリングと電力スケジューリングの違い

計算機のタスクスケジューリングと電力スケジューリングは共にデッドラインが存在するタスクのスケジューリングを行うものだが、相違する点もある。その相違点を表 2 にまとめる。特に電力スケジューリングの場合、QoS に加え、電力も考慮する必要がある。

シミュレーション実験

今回行った実験では、オフライン時における一日(24 時間)のデータを測定した。電力スケジューリングにおけるオンラインとは、システムの稼働中にスケジューリングを行う方式のことをいう。電気機器のタスクの実行時間、デッドライン、要求電力、各世帯の契約電力、プリエンティブ性が既知である一方、オフラインとはシステムの稼働前にスケジューリングを行う方式のことをいう。オンラインの仮定に加え、再生可能エネルギーによる供給電力、電気機器のタスクの到着時間が既知である。

また、電力スケジューリングは NP 問題であるため現実時間でのシミュレーションは不可能である。よって、先行研究[1]に契約電力制約を追加し応用することで、最適解は保証しないが優良解を算出するオフラインスケジューラを実装した。

オフライン総消費外部電力量カット指向スケジューリングアルゴリズムを図 4 に示す。初めに評価式(1)を用いてタスク T_i の評価値 $H(T_i)$ を算出する。タスク T_i はプリエンティブ性 F_i 、デッドライン D_i 、到着時間 A_i 、実行時間 U_i 、消費電力 C_i 、世帯番号 L_i の情報を持つ。また N はタスク数、 t_i は時間、

α はコントロール変数を表す。評価値の低い順に総消費外部電力量が最少となるように、スタートタイムまたはサスペンドタイムを決め、電力計画の上書きを行う。

$$H(T_i) = \alpha \times \frac{D_i - A_i - U_i}{\sum_{j=1}^N D_j - A_j - U_j} - \beta \frac{\sum_{t=0}^{U_i} C_{i,t}}{\sum_{j=1}^N \sum_{t=0}^{U_j} C_{j,t}} \quad (1)$$

評価

提案手法をシミュレーションによって評価した。次にシミュレーション実験の条件について述べる。

- ・要求電力、実行時間、クラス、到着時間、デッドラインの異なるタスクを 1200 個処理。
- ・各世帯(30 帯)契約アンペア(同時に使用可能な電気の量)を 3kVA に設定。
- ・電力モデルには、太陽光発電を想定。
- ・一分毎にスケジューリングを行う。
- ・スケジューラは、オフライン時における総消費外部電力量カット指向、ピーク消費電力カット指向[1]のスケジューラとオンライン時における Earliest Start Time First (ESTF) スケジューラの 3 パターン。

シミュレーションの結果を図 4 および表 3

に示す．図 4 からは，電力の推移とピーク電力がわかる．特にオフライン外部電力供給を減少させる(off-line exterior cut)アプローチは，太陽光で発電された電力によく追従している様子が分かる．

表 3 から，オフライン時のスケジューラは，電気機器のタスクのスタート時間を遅らせることで，online ESTF と比べ，総消費外部電力量，ピーク消費電力，ピーク消費外部電力をそれぞれ削減できることがわかった．一方，平均応答時間，全計算時間，平均遅延時間，最大遅延時間が増大した．

class	start time	preemption	example
A	immediately	×	hair drier
B	delayable	×	laundry machine, electric pot
C	delayable	○	electric car charge

表 1 電気機器のタスク

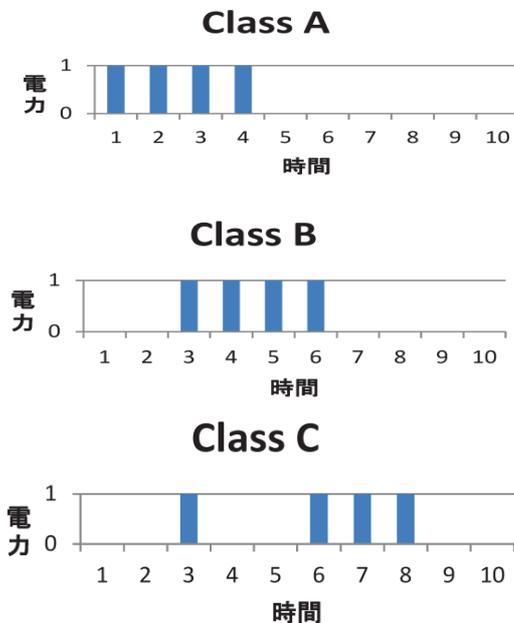


図 3 電気機器のタスククラス概念図

	計算機のタスクスケジューリング	電力のスケジューリング
タスク	プリエンティブマルチタスクが主流	プリエンティブなタスクとノンプリエンティブなタスクが混在. また, 個々のタスクは電力を要求する.
目的関数	<ul style="list-style-type: none"> 計算時間の高速化. 電力, 電力が目的関数の場合, マシン自身の省電力化を図る. 	<ul style="list-style-type: none"> ピーク消費電力. 電力コスト. 総消費外部電力量. 引数として, 再生可能エネルギーとタスクが要求する消費電力がある. スケジューリングを行っても, 電気機器自体の消費電力は変わらない.
リソース	CPU時間, メモリ, etc..	電力 (外部電力 + 再生可能エネルギーによる供給電力). 契約電力制約を満たす限り, 複数のタスクの同時実行が可能. また, 同時実行可能なタスク数は可変である.
タスクの分散方式	負荷 (タスク) を要求を出したノード以外に, 分散させることができる.	タスクの要求を出した, 世帯で実行させなければならない.
負荷	CPU使用率	消費電力/契約電力

表 2 計算機のタスクスケジューリングと電力スケジューリングの相違

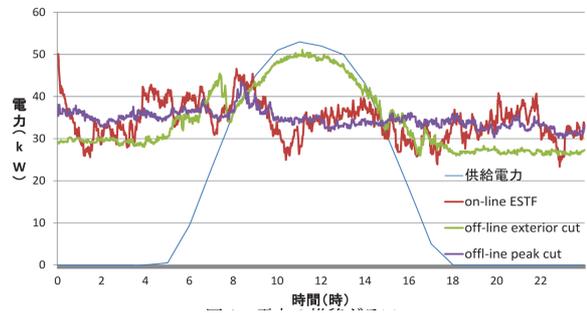


図 4 電力の推移グラフ

スケジューラ	online ESTF	offline exterior cut	offline peak cut
総供給電力量 (kWh)		416.5	
総消費電力量 (kWh)	820.87	825.62	830.26
総消費外部電力量 (kWh)	485.91	423.71	497.17
ピーク消費電力 (kW)	50.10	50.10	43.50
ピーク消費外部電力 (kW)	50.10	31.65	38.05
遅延違反タスク数 (個)	13	11	12
平均応答時間 (分)	62.92	139.27	97.41
全計算時間 (分)	1547	1761	1652
平均遅延時間 (分)	29.69	152.27	180.83
最大遅延時間 (分)	82	416	425

表 3 消費電力状況

関連する成果

上記電力スケジューリング方式のほか，電力計算の基盤となる FPGA を用いたアクセラレーション方式，メニーコア時代の相互結合網として有望な階層型相互結合網についても研究をした．

階層型相互結合網として，3D-TESH およびその派生型の相互結合網を考案した．階層間で消費電力や信号伝達速度が異なるので，違った物理特性を持つ接続リンクを階層的に扱えるようにし，次世代の計算基盤に必要な技術を開発した．これらの提案や評価は雑誌論文 1，および国際会議論文として掲載された．

FPGA を用いたアクセラレーション方式では，要求要件を元に演算器などの最適配置を行う手法を考案し，雑誌論文 2 として発表した．アクセラレーションについては，FPGA の他に GPGPU の可能性も検討し，学会発表論文 7 として発表した．

参考文献

[1] Junghoon Lee, Gyung-Leen Park, Sang-Wook Kim, Hye-Jin Kim and Chang Oan Sung, "Power consumption scheduling for peak load reduction in smart grid homes", SAC '11 Proceedings of the 2011 ACM Symposium on Applied Computing, Pages 584-588 (2011)

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2件)

1. Ala Ahmed Yahya Hag, M.M. Hafizur Rahman, Rizal Mohd Nor, Tengku Mohd Tengku Sembok, Yasuyuki Miura and Yasushi Inoguchi, "Uniform Traffic Patterns using Virtual Cut-Through Flow Control on VMMN", *Procedia Computer Science*, Elsevier, Vol. 59, pp.400-409, Aug., 2015 (査読有)
2. 荒木 光一, 佐藤 幸紀, 井口 寧, "FPGA ベース組み込み向け HW 開発における低消費電力指向の 自動ハードウェアチューニング", *信学論 D*, Vol. J98-D, No. 1, pp.182-192, Jan., 2015 (査読有)

[学会発表](計7件)

1. M.M. Hafizur Rahman, M. A. H Akhand, P.C. Shill and Yasushi Inoguchi, "Butterfly traffic pattern in selection algorithm on hierarchical torus network", 2nd International Conference on Electrical Engineering and Information and Communication Technology, 5 pages, Dakka (Bangladesh), May. 21-23, 2015
2. M.M. Hafizur Rahman, M.A.H. Akhand, Yasuyuki Miura, and Yasushi Inoguchi, "Hot-Spot Traffic Pattern on Hierarchical 3D Mesh Network", The 3rd International Conference on Advanced Computer Science Applications and Technologies, IEEE, pp.56-60, Amman (Jordan), Dec. 29-30, 2014
3. Faiz Al Faisal, M.M. Hafizur Rahman and Yasushi Inoguchi, "Dynamic Communication Performance of TTN with Uniform and Non-uniform Traffic Patterns Using Virtual Cut-Through Flow Control", The 3rd International Conference on Advanced Computer Science Applications and Technologies, IEEE, pp.133-138, Amman (Jordan), Dec. 29-30, 2014
4. Faiz Al Faisal, M.M. Hafizur Rahman and Yasushi Inoguchi, "Dynamic Communication Performance of STTN under various Traffic Patterns using Virtual Cut-Through Flow Control", 17th International Conference on Computational Science and Engineering, IEEE, pp.1804-1809, Chengdu (China), Dec. 19-21, 2014
5. Faiz Al Faisal, Yukinori Sato and Yasushi Inoguchi, "Introduction of a

New Interconnection Network that achieves high performance for Many-Core Processors", 2014 年度 電気関係学会 北陸支部連合大会, F1-3, 1 page in CD-ROM, 富山高専(富山県射水市), Sep. 11, 2014

6. 赤碕 翔太, 佐藤 幸紀, 井口 寧, "QoS を考慮した電力スケジューリングに関する研究", 2014 年度 電気関係学会 北陸支部連合大会, F1-1, 1 page in CD-ROM, 富山高専(富山県射水市), Sep. 11, 2014
7. 中吉 達二, 佐藤 幸紀, Yiyu Tan, 井口 寧, "GPGPU と MIC におけるアクセラレータ性能の比較", 2013 年度 電気関係学会 北陸支部連合大会, F1-10, 1 page in CD-ROM, 金沢大学(石川県金沢市), Sep. 21, 2013

[図書](計0件)

[産業財産権]

出願状況(計0件)

取得状況(計0件)

[その他]

表彰

1. 情報処理学会北陸支部 優秀論文発表賞
赤碕 翔太, 佐藤 幸紀, 井口 寧, "QoS を考慮した電力スケジューリングに関する研究", 2014 年度 電気関係学会 北陸支部連合大会, F1-1, 1 page in CD-ROM, 富山高専(富山県射水市), Sep. 11, 2014.

6. 研究組織

(1)研究代表者

井口 寧 (INOUCHI YASUSHI)

北陸先端科学技術大学院大学・

情報社会基盤研究センター・教授

研究者番号：90293406