

マルチエージェントによるアイランドモード・マイクログリッドの需給制御手法

加藤 匠^{1,2,a)} 高橋 秀幸^{1,2,b)} 笹井 一人^{1,2,c)} 北形 元^{1,2,d)} 金 学萬^{3,e)} 木下 哲男^{1,2,f)}

概要: 近年、電力の重要性が増すにつれ、新たなパラダイムがスマートグリッドやマイクログリッドの分野において多く提案されてきている。日本では東日本大震災後、特に持続可能な耐久性のある電力網の実現が期待されている。本稿ではマイクログリッドに焦点をあて、災害時の様々な障害に耐えうる、マルチエージェントを基にした需給制御手法を提案する。具体的には災害時に孤立したマイクログリッド内で需要家の性質を考慮しつつ電力配分を行うものである。実験により、提案手法の有効性を確認した。

キーワード: マルチエージェントシステム, マイクログリッド, 負荷制限, スマートグリッド, 需給制御

Multiagent-Based Supply-Demand Management in Islanded Microgrid

TAKUMI KATO^{1,2,a)} HIDEYUKI TAKAHASHI^{1,2,b)} KAZUTO SASAI^{1,2,c)} GEN KITAGATA^{1,2,d)}
HAK-MAN KIM^{3,e)} TETSUO KINOSHITA^{1,2,f)}

Abstract: As the importance of electricity has been significantly increasing, there are several new paradigms of power grid proposed in the field of Smart Grid and Microgrid. In Japan, especially after the Great East Japan Earthquake, new power grid paradigms are expected to be more sustainable and resilient to survive several difficulties during a disaster situation. In this paper, we focus on microgrid and propose a multiagent-based power allocation scheme to realize the sustainable and resilient power grid. The proposed power allocation scheme allocates electricity regarding the priority of loads in an islanded microgrid during a utility grid disturbance, and the effectiveness of the scheme is confirmed in the experiment.

Keywords: Multiagent System, Microgrid, Load Shedding, Smart Grid, Demand-Supply Management

1. はじめに

世界的に電力の使用量は年々増加傾向にあり、我々の生活はより電力に依存しつつある。電力および環境負荷低減の重要性から、スマートグリッドやマイクログリッドに関する研究が注目されている。日本では、東日本大震災以降、特に持続可能な耐久性のある電力網の実現が期待され

ている [1] [2]。例えば、一つの電線が切れた場合に他の電線から電力を送電するように自動で制御が切り替わる電力網や、電力の供給が止まった場合に、特定の需要家の電力消費を制限する事で他の需要家の電力消費を継続させることが可能な電力網などが挙げられる。

本稿では特に、小規模なコミュニティに電力を供給するための電力供給システムであるマイクログリッドに焦点を当てる。マイクログリッドは分散型発電機、分散型蓄電池、需要家から構成されており、需要家は商用の建物から学校、病院、工場など様々なものがある [3] [4]。マイクログリッドの構成概要を図 1 に示す。Microgrid Operation and Control Center(MGOCC) はマイクログリッド制御・運用センターである。マイクログリッド内の電力需要や供

¹ 東北大学大学院 情報科学研究科
² 東北大学 電気通信研究所
³ Department of Electrical Engineering, University of Incheon
a) takumi@k.riec.tohoku.ac.jp
b) hideyuki@riec.tohoku.ac.jp
c) kazuto@riec.tohoku.ac.jp
d) minatsu@riec.tohoku.ac.jp
e) hmkim@incheon.ac.kr
f) kino@riec.tohoku.ac.jp

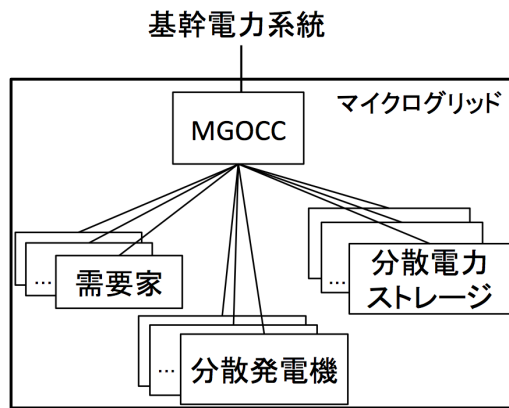


図 1 マイクログリッドの構成概要

Fig. 1 Microgrid Configuration Overview

給量などの情報を集め、マイクログリッド内の電力需給制御に関する決定を行い、分散型発電機、分散型蓄電池、需要家の制御をする。需要家はグリッド内の電力を消費する基本的なコンポーネントである。分散型発電機はマイクログリッド内で消費される電力を供給するために分散配置された発電機のコンポーネントである。分散型蓄電池はグリッドの状態に応じて電力を充電/放電する機能を持つコンポーネントである。

マイクログリッドは多くの制御コンポーネントから成るため、従来の集中型の制御方法で運用する事が難しい。分散したコンポーネントが他のコンポーネントの情報を基に動作、連携することが必要となる。そこで、エージェントシステムをマイクログリッドに適用した研究が数多く行われてきた [3] [4] [5]。

マイクログリッドには系統連携モードと自立運転モード(アイランドモード)の2つの運用モードがある。系統連携モードの場合、マイクログリッド内の需要と供給のバランスは基幹電力系統との電力のやりとりによって保たれる。アイランドモードの場合、マイクログリッドは電力系統から分離されているため、上流の電力とのやり取りはない。そのため、アイランドモードの場合は需要と供給のバランスを保つ事が難しい。アイランドモードのマイクログリッド内で電力が不足した際には、需要家が使う事のできる電力量を削減する必要がある。可能であれば、分散型蓄電池から電力を利用する事も必要となる。

アイランドモードには、意図的にアイランドモードで運用を行う場合と、何らかのトラブルによりアイランドモードで運用せざるを得なくなる場合がある。例えば、MGOCCの決定によるアイランドモードの運用と基幹電力系統の停電などの発生により電力系統から孤立した場合には、アイランドモードで運用する事となる。電力網の運用において、通常、需要家側は各々の需要が満たされない事を想定していないため、電力不足時の負荷制限は影響が大きい。東日本大震災のように広域で停電が発生するような災害時

には [2]、アイランドモードでの運用を強いられる。また、東京電力が実施した計画停電 [9] のような状況においては、マイクログリッドはアイランドモードで運用する必要があり、そのマイクログリッドの中で重要な需要家を守る事もまた重要である。ここで述べる重要な需要家とは、病院や災害時の避難所など社会的に重要度の高いものを指す。従来の電力網では、電気自動車の充電スタンドと病院を区別したり、優先順位をつけたりする事ができない。需要家の特性を考慮して需給制御を行う事が重要である。そこで本研究では、災害時などの様々な状況において、社会的に重要度の高い需要家に電力を優先する事が可能なマイクログリッドの実現を目指す。

2. 需給制御手法と問題点

2.1 関連研究

エージェントの自律性、協調性などの特徴を基本としたマイクログリッド、スマートグリッドの運用に関する研究が数多く行われている [3] [5] [11] [12]。

モバイルエージェントをマイクログリッドの監視と運用に応用した研究がある [13]。1つのモバイルエージェントがマイクログリッド内にあるコンポーネント間を移動し、情報の収集や運用の決定を行う。モバイルエージェントがマイクログリッド内を移動して決定を下すため、システム内に中央集権的なオペレーションセンターが不要である。しかし、マイクログリッドの規模が大きくなり、制御するコンポーネントの数が増えると、一つのモバイルエージェントで全体を管理・運用する事は非常に困難となる。

多くのコンポーネントを制御し、スケーラビリティを実現するために、マイクログリッドの階層的なコントロールを行う研究がある [14]。特に、アイランドモードの運用に焦点を当てており、多くのコンポーネントがマイクログリッドに参加した際、エージェント間で送受信される莫大なメッセージの処理負荷が問題となる点に着目し、組み込みシステムの制御向けの階層的制御手法を提案している [15]。

一方、マイクログリッド内の需要に合わせて分散型発電機の発電量を自立的に調節する研究がある [16]。マイクログリッド内の分散型発電機として再生可能エネルギーも想定しており、太陽光発電機の発電量の変化も考慮している。しかし、予め準備した需要家の要求の値に対して発電機側を合わせるシミュレーションモデルで実験を行っており、需要家の要求が電力の供給量によって変化するという点を無視している。

また、アイランドモードの電力の配分に焦点を当てた研究がある [18]。この研究は、マルチエージェントベースのアイランドモードにおいて、破産問題の解決に用いられるタルムード則 [19] を用いて負荷制限のポリシーを決定する。具体的には、マイクログリッド内で電力不足が発生し

た際の配分に利用している。

2.2 技術的課題

本研究は災害時などにおけるアイランドモードの自立的な運用に焦点を当てている。既存研究で提案されているマルチエージェントの制御アーキテクチャは、マイクログリッドの運用において、全てのコンポーネントが全てのコンポーネントからアクセス可能な状態を想定している。そのため、制御情報のやり取りなどには、アクセス制御を行うためにより階層的な手法を検討する必要があると考える。また、既存研究では特定の需要家に電力を優先するといった概念が無く、全ての需要家を同列に扱っている。ゆえに電力消費量の多い需要家が、グリッド内の電力の多くを消費する。そのため本研究では、アイランドモードのマイクログリッドにおいて、特定の需要家に電力を優先する手法を提案する。現状のマイクログリッドでは、

- P1 全ての分散発電機、分散蓄電池、需要家がアクセス制御の機構を介さずお互いにアクセスすること
- P2 大きな電力需要家が、アイランドモード時に大量の電力を消費してしまうことを防ぐこと

が困難である。全ての分散発電機、分散蓄電池、需要家がアクセス制御の機構を介さずアクセスした場合 (P1)、全てのコンポーネントからのメッセージが MGOCC に集中するため、膨大な処理負荷が MGOCC に生じる。さらに、発電機と需要家が直接やり取りをして行動を決定すると、コンポーネントが MGOCC のポリシーに反する動きをしてしまう可能性がある。

また、従来のシステムでは需要家の性質を考慮して優先順位をつける事ができなかったため、大きな電力需要家がアイランドモード時に大量の電力を消費してしまい、電力を優先されるべき需要家が電力を使えないという状況が発生する (P2)。例えば災害時に基幹電力系統が停電したマイクログリッド内にある避難所に電力を優先することがこれまで出来なかった。

3. 需要家の性質を考慮した需給制御手法の提案

3.1 概要

本研究では、需要家の性質を考慮した需給制御手法を実現するために、マルチエージェントによる

S1 階層的マイクログリッド運用手法

S2 需要家の優先度を考慮した需給制御手法

を提案する。具体的には、メッセージが集中する事による MGOCC の処理負荷や、MGOCC を介さないコンポーネント同士の交渉を防ぐために (P1)、それぞれの役割 (ロール) を持つエージェント間の情報伝達の階層化により、メッセージングに制限を加えるアーキテクチャを提案する (S1)。また、大きな電力需要家が、アイランドモード時、大量の

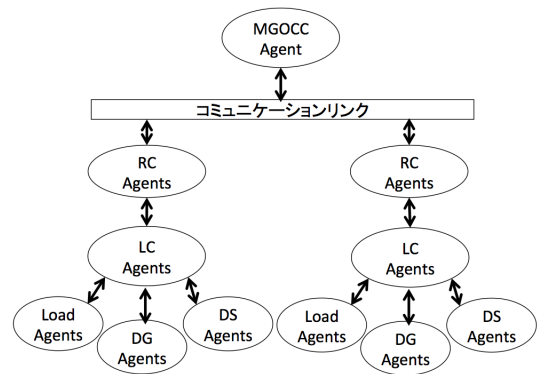


図 2 エージェントの組織構造

Fig. 2 Proposed Agent Organization Architecture

電力を消費する事を防ぐために (P2)、需要家の優先度を考慮した需給制御手法を提案する (S2)。

3.2 階層的マイクログリッド運用手法

提案するアーキテクチャの概要を図 2 に示す。アーキテクチャにはロールが 6 個あり、エージェントは Microgrid Operation and Control Center (MGOCC) Agent, Regional Control (RC) Agent, Local Control (LC) Agent, Load Agent, Distributed Generator (DG) Agent, Distributed Storage (DS) Agent から構成される。MGOCC Agent はマイクログリッド内のコンポーネントの情報を集め、運用・制御に関する決定を行う。Load Agent, DG Agent, DS Agent はローカルのコンポーネントの情報収集と、LC Agent の指示に従いローカルのコンポーネントを制御する。LC Agent は Load Agent, DG Agent, DS Agent からメッセージを受信し、RC Agent に集約した情報を送信する。このように情報の伝達を階層化する事により、特定のエージェントへのメッセージの集中や、MGOCC のポリシーにそわないコンポーネント同士の交渉を防ぐ事が可能になる。

3.3 需要家の優先度を考慮した需給制御手法

需要家の優先度を考慮した需給制御手法の概要を図 3 に示す。図 3 において、分散型蓄電池は電池であり、需要家 (Load) は、住居 (house) と工場 (factory) である。基幹電力系統が利用できない場合、マイクログリッドは重要な需要家に電力を優先する。図 3 の場合、まずはマイクログリッド内に居住している人々のライフラインの維持のために、住居には優先されて電力が送られている。これは住居以外の電力は全てカットするという意味ではなく、住居の要求を満たした後、残った電力を工場に割り当てるといった二段構えを取っている。本稿では、需要家側の要求する電力量、発電機の発電量、ストレージが提供する電力量などは予め与えられているものとする。

需給制御手法における電力配分のフローを図 4 に示す。配

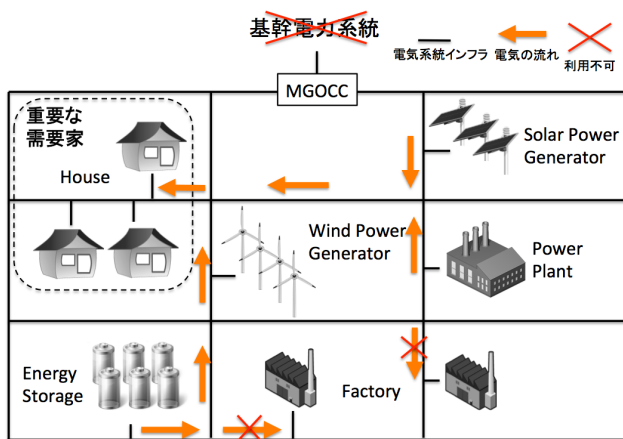


図 3 需要家の重要度を考慮した Load Shedding の概要

Fig. 3 Overview of Proposed Load Shedding Considering the Priority of Loads

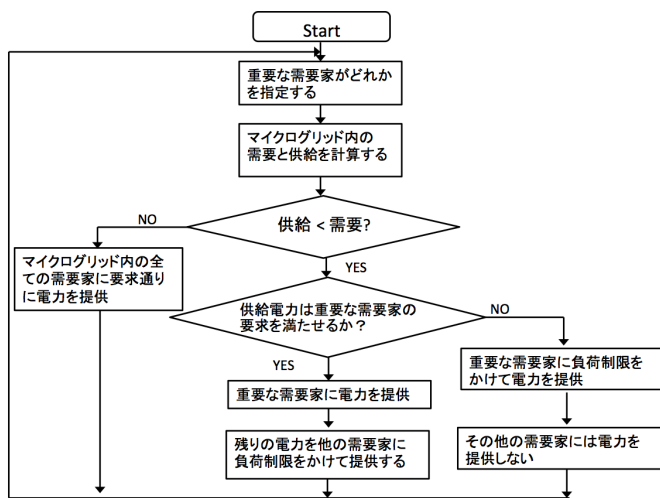


図 4 電力配分のフロー

Fig. 4 Proposed Flow of Power Allocation

分の計画は、コンポーネントの情報を集めた後の MGOCC Agent によって決定される。最初に MGOCC はどの需要家が現在の状況で重要なロードかを判断し、利用可能な電力量と需要家の要求をそれぞれ計算する。要求の電力が利用可能な電力量の総量を超えている場合、MGOCC は利用可能な電力量と重要な需要家の要求の合計と比較する。利用可能な電力量が重要な需要家の要求を満たす事ができる場合はまず重要な需要家に電力を割り当て、残りの電力を他の需要家に割り当てる。その他の需要家の要求が供給を上回っている場合は、比例配分法やタルムード則などの既存のリソース配分の手法を用いて、電力を配分を決定する。利用可能な電力量が重要な需要家の要求を満たす事ができない場合、上記の既存のリソース配分の手法を用いて、電力を配分を決定し、その他の需要家には電力を割り当てない。以上のように二段構えで需要家の優先度を考慮し、需給の制御を行う。

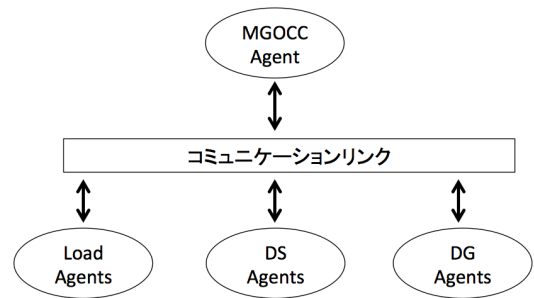


図 5 エージェントの構成

Fig. 5 Agent Configuration

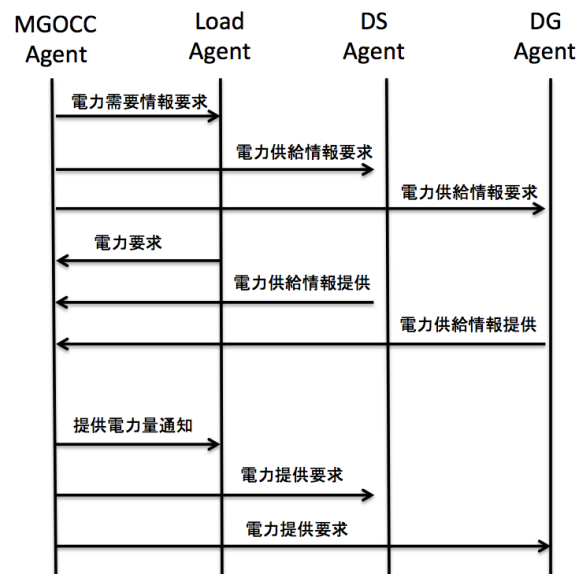


図 6 エージェント間のメッセージフロー

Fig. 6 Message Flow Among Agents

4. 実験と評価

提案した需給制御手法を評価するため、実験システムを実装した。本実験の目的は、提案の効果として、重要な需要家の要求充足度がどの程度高いかを示す事である。実験システムのエージェントの構成は図 5 の通りである。MGOCC は Load Agent, DS Agent, DG Agent と直接メッセージを交換する。図 6 にエージェント間でやりとりされるメッセージフローを示す。MGOCC は Load Agent に電力の需要, DS Agent に蓄電量, DG Agent に発電量をそれぞれ要求する。要求を受け取ったあと、Load Agent は要求する電力量を, DS Agent は蓄電量を, DG Agent は発電量を MGOCC に通知する。これらの情報を受け取った後、MGOCC は電力の配分を決定する。電力配分は図 4 のフローに従う。配分量の決定後、MGOCC は需要家、分散型蓄電池、分散型発電機に割り当てられた電力の情報、または電力提供の要求を送る。実験システムは、ADIPS/DASH Agent を採用し、統合開発環境である IDEA を用いて開発した [20] [21]。図 7 にマイクログリッドの運用サイクル

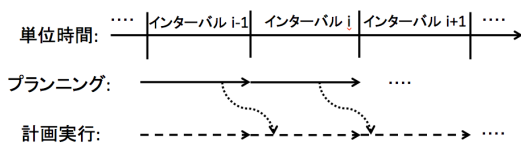


図 7 マイクログリッドの運用周期
 Fig. 7 Microgrid Operation Cycle

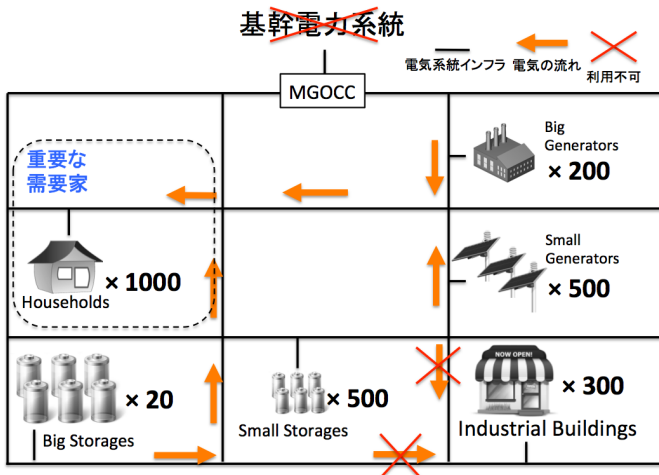


図 8 想定するマイクログリッドの実験シナリオ
 Fig. 8 Overview of Simulated Microgrid

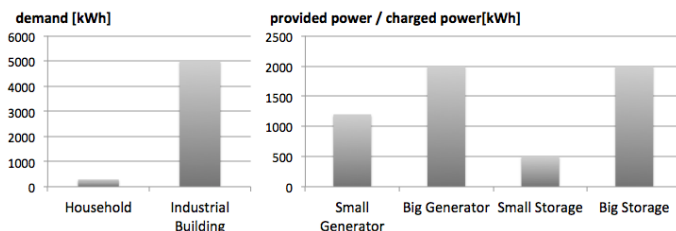


図 9 シミュレーションの初期状態
 Fig. 9 Initial State of Simulated Microgrid

を示す。インターバルはマイクログリッドを運用する上での時間単位であり、MGOC はインターバルごとに情報の収集、プランニング、計画の実行を行う。例えば、インターバル i においては、MGOC はインターバル $i+1$ の運用の計画をしながら、インターバル $i-1$ で計画された運用を実行する。想定するマイクログリッドの実験シナリオの概要を図 8 に示す。また、マイクログリッドの各コンポーネントの初期状態を図 9 に示す。図 8、図 9 の Household と Industrial Building は需要家であり、本実験では Household を重要な需要家と指定した。Household は 1000 個、Industrial Building は 300 個とした。Big Storage と Small Storage は分散型蓄電池であり、それぞれ 20 個と 500 個とした。Big Generator と Small Generator は分散型発電機であり、それぞれ 200 個と 500 個とした。なお、分散型発電機から発電される電力の量はインターバルごとに変化する。Big Generator と Small Generator は、インターバルごとに残った電力が蓄えられる。またインター

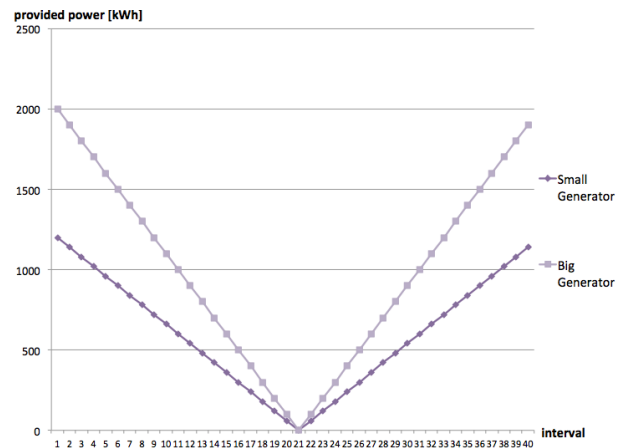


図 10 分散型発電機の発電量推移
 Fig. 10 Transition of Power Generation by DGs

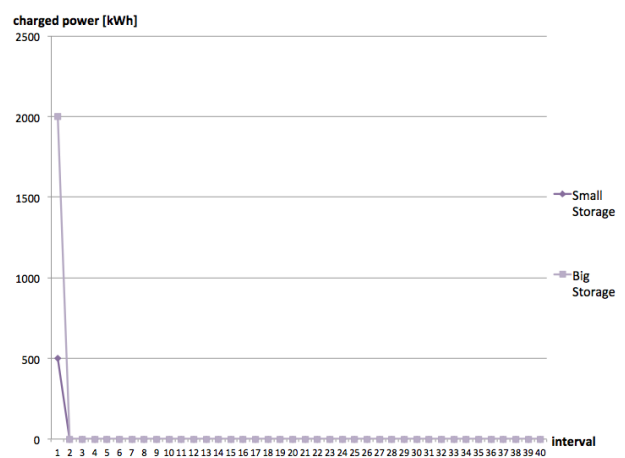


図 11 分散型蓄電池の蓄電量推移
 Fig. 11 Transition of Charged Power in DSs

バルごとに、分散型発電機が提供する電力がマイクログリッド内の要求を満たせない場合、電力ストレージに蓄えられている電力を使用する。シミュレーション開始時の発電量、蓄電量は図 9 の通りである。需要家からの要求はシミュレーションの間変化しないものとする。

実験シナリオは、マイクログリッドから基幹電力系統が利用不可能になったためアイランドモードの運転になり、その後、分散型発電機の発電量は徐々に下がるが、一定時間経過後に発電量が回復するという状況を想定する。例えば、災害時に基幹電力系統が使えなくなり、物理的な流通が途絶え、分散型発電機が使用する燃料が少なくなり発電量が落ちるが、徐々に燃料の流通が回復し、発電量が回復するといった状況を想定する。本実験では、太陽光発電機も含めているため、昼から夜にかけて発電量が減少していき、日が出てくると持ち直す動作を組み込んでいる。図 10 に分散型発電機の発電量の推移、図 11 に分散型蓄電池に充電されている電力量、図 12 に各需要家への電力配分の推移をそれぞれ示す。図 10、図 11、図 12 の横軸はインターバルである。図 10 の縦軸は分散型発電機の発電量、図

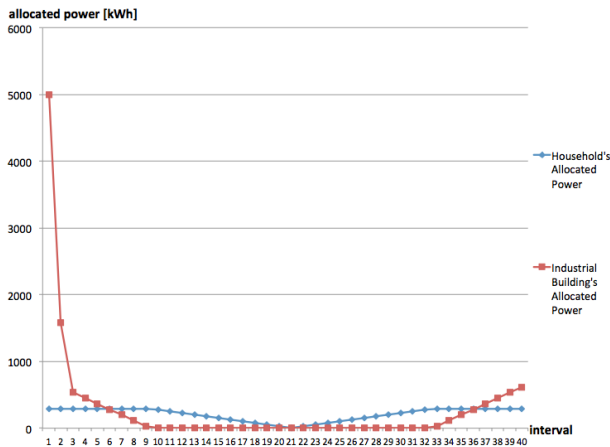


図 12 各需要家への電力配分の推移

Fig. 12 Transition of Power Allocation to Loads

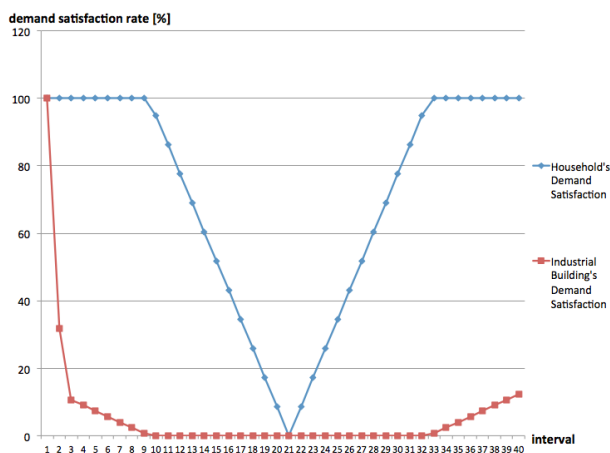


図 13 各需要家の電力要求充足度の推移

Fig. 13 Transition of Demand Satisfaction Rate

11の縦軸は分散型蓄電池に充電されている電力量，図12の縦軸は需要家に供給された電力量である．図10に示されているように，マイクログリッド内で使用可能な電力は徐々に減っていく事がわかる．インターバル21では，マイクログリッド内で使用可能な電力がなくなるが，その後発電量は回復していく．それに伴い，各需要家への電力の割り当ても減っていき，その後発電量の回復とともに増えていくことが図12からわかる．

また，各需要家の要求充足度の推移を図13に示す．”Demand Satisfaction Rate”は需要家の要求がどの程度満たされたかを百分率で表した値であり，重要な需要家のこの値が高ければ高いほど本提案は有効であると言える．図13の縦軸はその要求充足率であり，横軸はインターバルである．図13より，マイクログリッド内で使用可能な電力が減るにつれ，重要な需要家として指定されていない需要家の要求充足度は減少する．対照的に，重要な需要家として指定されている需要家の要求充足度はインターバル9まで100%であり続ける．インターバル21で0になった後も，分散型発電機の発電状況の増加と比例して要求充足度は回

復した．実験結果より，提案手法は重要な需要家の要求充足率を利用可能な電力が減っていく中でより長く高く保ち，利用可能な電力が回復した際には早く要求充足率を戻す事ができた．

5. まとめ

アイランドモードのマイクログリッドにおけるマルチエージェントベースの需給制御の手法を提案し，評価を行った．実装した実験システムを用いた実験結果より本提案の有効性を確認できた．今後は需要家側が要求をまとめ，マイクログリッド内の利用可能電力などを考慮しながら要求を決定する，あるいは需要家の要求の管理やデマンドレスポンスをより具体的に検討する必要がある．さらに，分散型発電機や分散型蓄電池の振る舞いのモデルの詳細化を行う予定である．

参考文献

- [1] Pararas-Carayannis G., "The great tsunami of March 11, 2011 in Japan - analysis of source mechanism and tsunamigenic efficiency," OCEANS 2011, pp.1-10, 19-22 Sept. 2011.
- [2] Adachi T., "The restoration of telecom power damages by the Great East Japan Earthquake," Telecommunications Energy Conference (INTELEC), 2011 IEEE 33rd International, pp.1-5, Oct. 2011.
- [3] Aris L. Dimeas and Nikos D. Hatziargyriou, "Operation of a Multiagent System for Microgrid Control," IEEE Transactions on Power Systems, Vol. 20, No. 3, AUGUST 2005.
- [4] A. L. Dimeas, and N. D. Hatziargyriou, "A Multi-agent System for Microgrids", 2004 IEEE Power Engineering Society General Meeting, pp. 55-58 June 2004.
- [5] Zhang Jian, Ai Qian, Jiang Chuanwen, Wang Xingang, Zheng Zhanghua, Gu Chenghong, "The application of Multi Agent System in Microgrid coordination control," International Conference on Sustainable Power Generation and Supply, SUPERGEN '09, 2009.
- [6] Charles Concordia, Lester H. Fink, George Poullikkas, "Load Shedding on an Isolated System," IEEE Transactions on Power Systems, Vol. 10, No. 3, August 1995.
- [7] Jinwei Li, Jianhui Su, Xiangzhen Yang, Tao Zhao, "Study on Microgrid Operation Control and Black Start," 2011 4th International Conference on Electric Utility Deregulation and Restructuring and Power Technologies (DRPT), 2011.
- [8] "Implementation plan of rolling blackout on and after Tue, March 15, 2011," TEPCO Press Release, March 14, 2011, <http://www.tepco.co.jp/en/press/corpcom/release/11031406-e.html> (Accessed on Feb 6, 2012)
- [9] "Tokyo Electric Power Company (TEPCO)," <http://www.tepco.co.jp/en/index-e.html> (Accessed on April 9, 2012)
- [10] M. Wooldridge, An Introduction to Multiagent Systems, 2nd Edition, A John Wiley and Sons, Ltd, Publication, 2009.
- [11] A. L. Dimeas and N. D. Hatziargyriou, "Agent based Control for Microgrids", Power Engineering Society General Meeting, June 2007.
- [12] P. Vytelingum, T. D. Voice, S. D. Ramchurn, A. Rogers,

- and N. R. Jennings, "Intelligent agents for the smart grid," In Proceedings of the 9th International Conference on Autonomous Agents and Multiagent Systems: volume 1 - Volume 1 (AAMAS '10), Vol. 1. International Foundation for Autonomous Agents and Multiagent Systems, Richland, SC, pp. 1649-1650., 2010.
- [13] Junichi Arai, Shuichiro Yamazaki, Motohisa Ishikawa, and Toshiyuki Ito, "Study on a new power control of distributed generation in an isolated microgrid," Power & Energy Society General Meeting, 2009.
- [14] Duo Shao, Qi We, Tingzhi Nie, "A Multi-Agent Control Strategy in Microgrid island mode," 2011 The 6th International Forum on Strategic Technology, 2011.
- [15] Fei-Yue Wang and Cheng-Hong Wang, "Agent-Based Control Systems for Operation and Management of Intelligent Network-Enabled Devices," IEEE International Conference on Systems, Man and Cybernetics, 2003.
- [16] T. Logenthiran, D. Srinivasan, A. M. Khambadkone, and H. N. Aung, "Scalable Multi-Agent System (MAS) for Operation of a Microgrid in Islanded Mode," Drives and Energy Systems (PEDES) & 2010 Power India, 2010 Joint International Conference on Power Electronics, 2010.
- [17] Sarvapali D. Ramchurn, Perukrishnen Vytelingum, Alex Rogers, and Nick Jennings, "Agent-based control for decentralised demand side management in the smart grid," In The 10th International Conference on Autonomous Agents and Multiagent Systems - Volume 1 (AAMAS '11), Vol. 1. International Foundation for Autonomous Agents and Multiagent Systems, Richland, SC, pp. 5-12., 2011.
- [18] Hak-Man Kim, Tetsuo Kinoshita and Yujin Lim, "Talmudic Approach to Load Shedding of Islanded Microgrid Operation Based on Multiagent System," Journal of Electrical Engineering & Technology Vol.6, No.2, pp.284-292, 2011.
- [19] R. J. Aumann, and M. Michael, "Game theoretic analysis of a bankruptcy problem from the Talmud," Journal of economic theory, Vol. 36, pp. 195-213, 1985.
- [20] IDEA/DASH Tutorial: <http://www.ka.riec.tohoku.ac.jp/idea/index.html>. (Accessed on April 11)
- [21] T. Kinoshita, and K. Sugawara, "ADIPS Framework for Flexible Distributed Systems," T. Ishide (ed.), Multiagent Platforms, LNAI 1599, pp. 18-32, 1998.
- [22] Jin-Hong Jeon, Jong-Yul Kim, Hak-Man Kim, Seul-Ki Kim, Changhee Cho, Jang-Mok Kim, Jong-Bo Ahn, Kee-Young Nam, "Development of Hardware In-the-Loop Simulation System for Testing Operation and Control Functions of Microgrid," Power Electronics, IEEE Transactions on , vol.25, no.12, pp.2919-2929, Dec. 2010.