

電力ネットワークの中心性による優先度を考慮した分散型需給調整手法

Distributed Supply-Demand Adjustment Method Considering Priority based on Centrality of the Power Grid

柴田 大地 *1
Daichi Shibata

伊藤 孝行 *2
Takayuki Ito

名古屋工業大学 工学部 情報工学科
Department of Computer Science and Engineering

名古屋工業大学 情報工学専攻 / 情報科学フロンティア研究院

Master of Techno-Business Administration / Frontier Research Institute for Information Science, Nagoya Institute of Technology

The introduction of renewable energy is expanding globally due to the problem of global warming and the rise of energy prices. The renewable energy depends on the weather conditions, so load balancing and managing power-surpluses are main issues. In order to solve the problem, researches on electric power management by forming coalitions are actively conducted. Since there are demanders and suppliers in the coalition, it is necessary to properly match the supply and demand. Appropriate matching refers to matching that minimizes power loss and satisfies demand. In this paper, we propose a method for distributed trading electric power by using centrality of the power grid. And we compare the proposed method and the existing method by power simulation and show that the transmission can be reduced in the coalition.

1. はじめに

スマートグリッドの導入が世界的に注目を集めている。スマートグリッドとは電力の流れを制御、最適化することのできる電力網のことである。スマートグリッドにより、電力事業所から末端の電力機器までを高機能的な電力制御端末同士により結び合わせ、自立分散的な制御が可能となる。従来では、大規模な発電所から一方的に電力を送り出す方式を取っていた。しかし化石燃料の枯渇といった問題から、再生可能エネルギーの導入の拡大が必要とされている。

加えて近年、電力の供給信頼性の向上が求められており、従来型の大規模集中型から脱却するために、太陽光発電等に代表される分散型電源の導入に期待が集まっている。しかし分散型電源が大量に導入されることで、電力システムに悪影響を及ぼすことが懸念されている。例として逆潮流に伴う配電システムの電圧上昇や分散型電源の激しい出力変動に起因する周波数変動などが挙げられる。さらに分散型電源が導入された状況では電力ネットワークが複雑化し、集中型の処理において適切なコントロールが難しくなると考えられているため、電力の需給システムは分散型のシステムへ移行する必要がある。そのため分散型電源やマイクログリッドの実現手段として、マルチエージェントシステムを導入する研究やエージェントの協調動作による電力マネジメントの研究が広く行われている [1] [2]。

協調動作を行い電力融通を行うためには、需要エージェントと供給エージェントのマッチングを決定する必要がある。ここでのマッチングとは供給エージェントが送電先と送電量を決定することである。電力融通を行う際、送電ロスを軽減するマッチングが望ましい。しかし理想的なマッチングを行うためには全ての組み合わせを計算するため、計算時間的に困難である。そこで本稿では電力ネットワークの中心性の優先度に基づいた分散型需給調整手法を提案する。電力ネットワークの中心性を

用い負荷が集中するエージェントを予測し、マッチングを最適化に近づけることで送電ロスの抑制に繋げる。

本稿の構成を述べる。2章では電力ネットワークの需給調整の詳細と関連研究について述べる。次に3章では提案手法である電力ネットワークの中心性に基づく需給調整手法について述べる。次に4章では評価実験として実際のデータに基づき電力シミュレーションを行い、シミュレーションの結果を示す。そして5章に本稿のまとめと今後の課題を示す。

2. 電力ネットワークの需給調整

本研究の先行研究として、GreedEnEx [3] がある。GreedEnExとは需要量に基づき貪欲的に電力需給の調整を行うアルゴリズムである。高速に電力の調整が行うことができるが、集中制御型の手法であるため規模の増大に対応できないといった問題がある。そのため本研究では分散型の電力需給調整手法を提案する。

また文献 [4] では送電距離が小さくなるように、需要家と供給元のマッチングを交換していくアルゴリズムを提案している。電力融通の送電距離に着目しており、マッチングを繰り返すことにより全体の最適化に近づけている。本研究では送電距離のみではなく、電力ネットワークの中心性を用いることでより最適なマッチングを求めている。

本研究では全ての家庭が太陽光発電及び蓄電池を取り入れており、加えて各家庭間で自由な電力取引が可能であることを仮定する。直接繋がっていない家庭間であっても間接的に電力融通が可能であるとし、さらにすべての家庭間で通信が可能であるとしている。

3. 電力ネットワークの中心性に基づく需給調整

電力の需給調整を行う際に、電力ネットワークの特徴を得ることは重要である。本研究ではエージェント間の最短経路上にいるエージェントほど電力供給を受けやすい/電力要求を受け

連絡先: 柴田 大地, 名古屋工業大学 工学部 情報工学科, shibata.daichi@itolab.nitech.ac.jp, 伊藤 孝行 名古屋工業大学 情報工学専攻/情報工学科/情報科学フロンティア研究院 ito.takayuki@nitech.ac.jp

やすいエージェントと考える。

電力供給を受けやすい需要エージェントの中心性を電力ネットワークの供給中心性として以下の式 (1) によって定める。

$$bs_i = \frac{\sum_{i_s \in S; i_s \neq i} \sum_{i_t \in N; i_t \neq i} (g_i^{(i_s, i_t)} \times S_{i_s})}{\sum_{i \in S} S_i} \quad (1)$$

$g_i^{(i_s, i_t)}$ はノード i_s からノード i_t へ行く経路の中でノード i を通る経路の数であり, S_{i_s} は供給ノード i_s の供給量を表す。

同様に電力要求を受けやすい供給エージェントの中心性を電力ネットワークの需要中心性として以下の式 (2) によって定める。

$$bd_i = \frac{\sum_{i_d \in D; i_d \neq i} \sum_{i_t \in N; i_t \neq i} (g_i^{(i_d, i_t)} \times D_{i_d})}{\sum_{i \in D} D_i} \quad (2)$$

$g_i^{(i_s, i_t)}$ はノード i_s からノード i_t へ行く経路の中でノード i を通る経路の数であり, D_{i_d} は需要ノード i_d の需要量を表す。

また本研究では, 契約ネットプロトコル [5] を利用しエージェント間で分散協調動作を行う。契約ネットプロトコル (Contract Net Protocol) とは, 複数のエージェントにタスクを割り当てるためのプロトコルで, 人間社会における交渉過程をエージェント間の合意形成に応用したものである。契約ネットプロトコルはマルチエージェントシステムを協調動作させるための有効な手段の1つとして知られている。契約ネットプロトコルでは, まずマネージャーがタスクを提示し, 次に契約者が各自の評価基準でタスクを選択し入札することでタスクを配分する。

図1は供給エージェントと需要エージェントのやり取りの流れを示したものである。本研究では電力を持つ供給エージェントがコミュニティを管理するエージェント (CMS) を通じて需要エージェントに通知を行う。そして需要エージェントが距離が最短の供給エージェントへ電力要求を行う。そして要求を受けた供給エージェントは電力ネットワークの中心性に基づき, 電力の融通先を決定することで分散型の電力融通を実現する。

4. アルゴリズム

4.1 Step1:Notify

各家庭エージェントはそれぞれ需要量と供給量を計算する。需要量が供給量を上回れば需要エージェント, そうでなければ供給エージェントとなる。そして供給エージェントと需要エージェントはそれぞれコミュニティ管理システムに需要量/供給量の通知を行う。コミュニティ管理システムは通知に基づき式(1), 式(2)の通りに中心性の計算を行う。

4.2 Step2:Report

コミュニティ管理システムは需要家と供給家に計算結果を通知する。コミュニティ管理システムの通知を合図として, 電力の需給調整を開始する。

4.3 Step3:Request

需要エージェントは供給エージェントに電力要求を行う。ここで需要エージェントは以下の式 (3) に基づき評価値をつけ電力要求の優先度を求める。

$$e_i = -bs_i * \frac{dist(i)}{\sum_{i \in S} dist(i)} \quad (3)$$

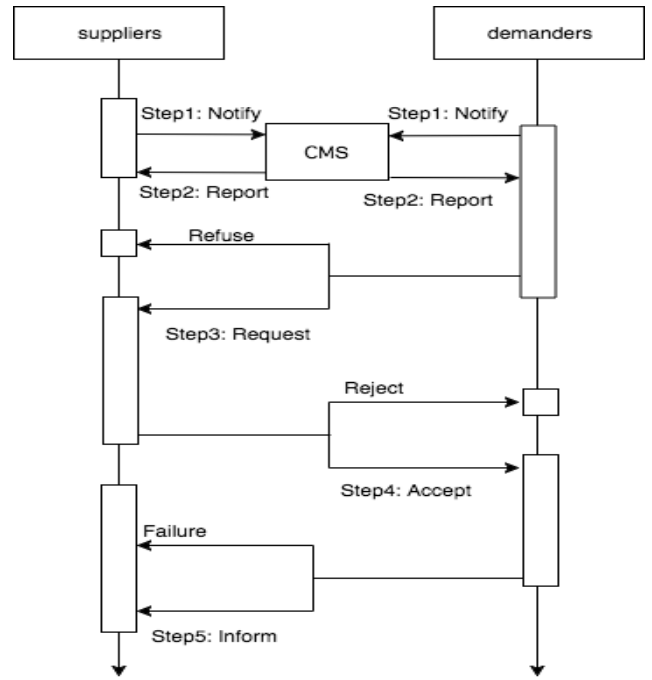


図 1: 需要家と供給家の電力融通の流れ

$dist(i)$ は電力要求を行う需要エージェントとエージェント i 間の距離を表す。

本研究では全ての需要エージェントが同一の戦略に基づいて協調動作を行うことを想定している。

4.4 Step4:Accept

需要エージェントの電力要求に対し, 供給エージェントは Accept か Reject のどちらかの行動を取る。複数の需要エージェントから電力要求があった場合は以下の式 (4) に基づいて評価値を算出し, 優先度の最も高いエージェントに Accept を送る。

$$e_i = -bd_i * \frac{dist(i)}{\sum_{i \in D} dist(i)} \quad (4)$$

$dist(i)$ は供給エージェントからエージェント i への距離を表す。

4.5 Step5:Inform

Accept を受けた需要エージェントは最後に通知を行い電力融通を受ける。Step3 から Step5 を繰り返すことで, 電力の需給調整を達成する。

5. 評価実験と考察

5.1 設定

電力シミュレーションにより提案手法の評価実験を行う。評価実験では電力ネットワークとして実距離を考慮したスモールワールド・ネットワーク [6] [7] を用いる。家庭の電力需要データは経済産業省資源エネルギー庁と東京電力が公表しているデータを使用した。提案手法または比較手法を適用した場合の送電ロスと電力融通量を評価し考察を行う。

表 1: シミュレーションの設定

parameter	value
シミュレーション日数	5
家庭エージェント数	128
タイムステップ数/日	96
家庭エージェントの電力消費量/日	約 8.5kWh
家庭の蓄電池容量	5kWh
電力事業所数	1
送電線の抵抗率	1.31 Ω/km
送電線の電圧	6600V

表 2: コミュニティ内での電力融通量

提案手法	比較手法 1	比較手法 2
4552.5kWh	4511.4kWh	4539.7kWh

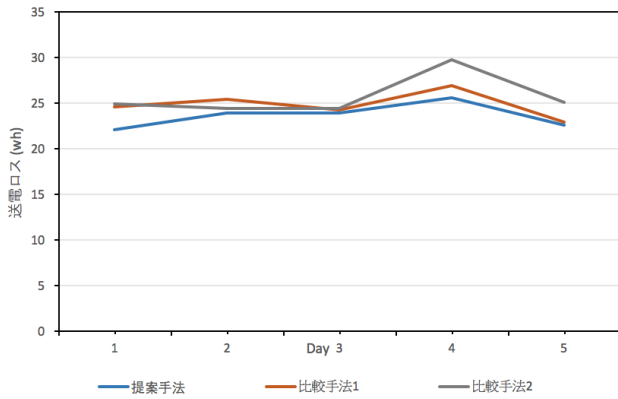


図 2: 送電ロスの比較

送電ロスは以下の式 (5) にて表す [8].

$$loss(i, j) = \left[\frac{P(E)}{\Psi} \right]^2 \times \alpha \times dist(i, j) \quad (5)$$

$P(E)$, Ψ , α , 及び $dist(i, j)$ はそれぞれ家庭 i から家庭 j 間の電力網に流れる電力量, 送電線の電圧, 送電線の抵抗率, 及び家庭 i と家庭 j 間の距離を示す.

比較手法 1 には電力ネットワークの中心性を用いず距離のみで評価値を決定する手法, 比較手法 2 として 2 章にて説明を行った GreedEnEx [3] を用いた. また実験設定のパラメータを表 1 に示す.

5.2 結果

表 2 に家庭間の電力融通量, 図 2 にそれぞれの手法を用いた時の送電ロスの値を示す. 表 2 より電力融通量は提案手法の場合のほうが多いが, 提案手法は送電ロスを比較手法 1 と比較すると 5%, 比較手法 2 と比較すると 8.4%抑制することができている. これは提案手法が電力ネットワーク全体の負荷を考慮し, 適切な需給調整を行っているためと考えることができる. また提案手法では距離のみを考慮する手法や需要量と距離を考慮する手法よりも, 送電ロスを抑制することができているため電力ネットワークの中心性を用いることが電力の需給調整に有効であるといえる.

6. まとめ

本稿では, 電力ネットワークの中心性を用いることで効率的な需給調整が可能であることを明らかにした. 効率的な受給調整により, 送電ロスの抑制を達成した. 電力ネットワークの中心性を定義するために, 電力の需要量/供給量とネットワークの媒介中心性を利用した. その後, 契約ネットプロトコルの考えを基に, エージェント間で協調動作を行うための手法を提案した.

今後の課題として, 実験規模の増大や提案手法による改善幅が十分であるかの検証を行っていく必要がある. また本稿では故障の影響を考慮していないが, 故障等によるネットワークの制限による考察を行っていくことが今後の方向性として考えられる.

参考文献

- [1] Makoto Nimi Yuichi Enoki, Takayuki Ito. A method for trading electric power based on dynamic community formation: An instantiation of coalition formation protocol dnpk-cfm based on kernel. *Transactions of Information Processing Society of Japan*, 57(12):2849–2858, dec 2016.
- [2] C. M. Colson, M. H. Nehrir. Algorithms for distributed decision-making for multi-agent microgrid power management. *2011 IEEE Power and Energy Society General Meeting*, strony 1–8, July 2011.
- [3] Shantanu Chakraborty, Shin Nakamura, Toshiya Okabe. Real-time energy exchange strategy of optimally cooperative microgrids for scale-flexible distribution system. *Expert Syst. Appl.*, 42(10):4643–4652, Czerwiec 2015.
- [4] Kosuke Asami, Akira Yamashita, Ryo Kutsuzawa, Naoya Takemura, Jun Matsumoto, Hidetoshi Takeshita, Naoaki Yamanaka. Power matching method in smart grid considering user satisfaction by PIAX platform. *17th IEEE International Conference on High Performance Switching and Routing, HPSR 2016, Yokohama, Japan, June 14-17, 2016*, strony 128–133, 2016.
- [5] Reid G. Smith. The contract net protocol: High-level communication and control in a distributed problem solver. *IEEE Trans. Computers*, 29(12):1104–1113, 1980. Correction: *IEEE Transactions on Computer* 30(5): 372 (1981).
- [6] Marek Biskup. On the scaling of the chemical distance in long-range percolation models. *Ann. Probab.*, 32(4):2938–2977, 10 2004.
- [7] D. J. Watts, S. H. Strogatz. Collective dynamics of ‘small-world’ networks. *Nature*, 393(6684):409–10, 1998.
- [8] Walid Saad, Zhu Han, H Vincent Poor, Tamer Başar. Game-theoretic methods for the smart grid: An overview of microgrid systems, demand-side management, and smart grid communications. *Signal Processing Magazine, IEEE*, 29(5):86–105, 2012.