

博士論文

再生可能エネルギーを含むマイクログリッドに
おける自律分散型電力取引支援システム
Autonomous decentralized power trading system
in microgrid with renewable energy

指導教官 辻 隆男 准教授

平成 27 年 9 月

学籍番号 11SD107

横浜国立大学大学院 工学府

物理情報工学専攻 電気電子ネットワークコース

河又 啓

要約

太陽光発電（Photovoltaic generation: PV）や風力発電（WindTurbine generation: WT）等の再生可能エネルギー（RenewableEnergy: RE）に対する期待の高まりや技術発展から、近い将来、需要地近傍における RE の大量導入が予想される。またガスエンジンなどの可制御な分散型電源（DistributedGenerator: DG）も、コジェネとしての効率改善が進展し、需要地サイドの魅力的な電源として普及が進展している。しかしながら、このような電源を大量に導入すると様々な問題が生じることが懸念されており、マイクログリッドの概念はその対策の一つとして期待されている。特に大量の RE が導入されているマイクログリッドでは、上位の系統と連系を有しながら、マイクログリッド内で適切な需給制御を実現することが重要な課題となる。マイクログリッドが主系統に連系されている場合、周波数変化は主として主系統の需給バランスに依存するので、周波数情報は利用できない。加えて、電力市場の規制緩和の進展から DG の所有者は多様化し、個々の DG を系統運用者の指令で直接制御することは難しい。以上の問題を解決するためには、個々の DG がマイクログリッド内の需給バランスの状況を監視しながら、経済合理性に従って自らの行動を自律的に決定する“自律分散型の運用制御メカニズム”の構築が有効である。以上の背景の下、本稿では自律分散型システムの実現に向けて、“モバイルエージェント（Mobile Agent: MA）技術”を活用した新しい需給制御方式を提案する。低圧連系の需要家にまで自由化が進展した場合、各需要家は電力を購入する事業者を自由に選択できると考えられる。すなわちマイクログリッド内の需要家に関しては、上位系統を介して一般電気事業者から購入する場合もあれば、マイクログリッド内の DG 所有者から購入することも可能である。これらの取引はいずれも相対取引とみなすことができる。本論文の提案手法では、移動性を有するモバイルエージェントが積極的に情報通信システム内を移動し、これら相対取引の仲立ちをすることで電力取引の支援を行う。システム全体としての望ましい電力取引結果は、マイクログリッド内にローカルな電力取引市場が形成されたことを想定し、原理的にはこの均衡解になると理解でき、数値計算を通して検討を行った。

目次

要約

目次

第1章 序論	1
第2章 分散型電源とマイクログリッド	7
2.1 分散型電源の普及拡大	7
2.2 電力系統における分散型電源と諸問題	8
2.3 分散型電源と協調する新しいシステム技術	12
第3章 マイクログリッドモデル	14
第4章 MA 技術による需給制御方式	19
4.1 可制御 DG 群による需給制御	19
4.2 需要家と DG 所有者の行動モデル	25
4.3 学習モデル	26
4.4 再生可能エネルギー導入時の対応	26
第5章 数値計算例	29
5.1 数値計算設定	29
5.2 数値計算結果	32
5.2.1 DG 所有者のみが RE 所有者と交渉できる場合 (case 1)	32
5.2.2 需要家も RE 所有者と交渉できる場合 (case 2)	37
5.2.3 市場取引による中央集散的運用方式との比較	41
5.2.4 デマンドレスポンス	45
第6章 結論	47
謝辞	48
参考文献	49

発表文献.....	54
-----------	----

第 1 章

序論

太陽光発電（Photovoltaic generation: PV）や風力発電（Wind Turbine generation: WT）等の再生可能エネルギーに対する期待の高まりや技術発展から、需要地近傍における再生可能エネルギー電源の大量導入が世界的に大きく進展している。またガスエンジンなどの可制御な分散型電源（Distributed Generator: DG）も、コジェネとしての効率改善が進展し、需要地サイドの魅力的な電源として普及が進展している。しかしながら、このような電源を大量に導入すると様々な問題の生じることが懸念されている。まず、再生可能エネルギー電源や分散型電源の総量が比較的小さい間は、地域ごとの導入量には大きな格差があると考えられる。大容量の再生可能エネルギーや分散型電源を含む配電系統においては、余剰の電力の逆潮流に伴い過電圧の生じる可能性がある。この電圧変動は再生可能エネルギーや分散型電源の出力に応じて変動するため、柔軟かつ高速に電圧を維持する制御技術の進展が必要となる。同様に、小規模分散型の電源の普及拡大が進展すると、配電系統においては三相不平衡や高調波の増大、さらには短絡容量の増加など、電力品質や事故対応の観点から様々な問題が生じる。一方で、再生可能エネルギーの気象条件に依存した出力の不確実性は、電力系統全体での需給管理の観点からも、大きな問題を引き起こすことが懸念されている。一般に PV や WT の出力変動は、多数台の再生可能エネルギーが導入された場合には平滑化効果（あるいは集合化効果）の働くことがよく知られている。これは、PV や WT の個々の出力変動のタイミングが異なるため、高周波帯を中心に互いの出力変動が相殺されることにより、系統全体で合計した出力変動は平滑化されて、比較的緩やかなものになることを示す。この平滑化効果は需給管理を緩和にする重要な特性ではあるが、平滑化効果を反映した場合でも依然として再生可能エネルギーの出力変動は不確実かつ不安定であり、この変動に適切に供給力を追従させることは重要な技術課題である。

小規模分散型電源の進展に合わせて、マイクログリッドの概念も非常に重要となってきた。一般にマイクログリッドは分散型電源を含む小規模系統であり、上位の電力系統と一点で連系を有する。上位の系統で供給支障が生じた場合には連系点を開放して分散型電源の供給力を活用した自立運転へと以降することで、事故等の発生時における電力供給の継続が期待できる。このように、

マイクログリッドの概念はその対策の一つとして期待されている⁽¹⁾。特に大量の再生可能エネルギーが導入されているマイクログリッドでは、上位の系統と連系を有しながら、マイクログリッド内で適切な需給制御を実現することが重要な課題となり、様々な研究が行われている。風力発電の普及拡大が進展しているポーランドでは、送電線過負荷および需給調整が重要な課題となっている。文献(2)では、対象エリアに出入りする潮流量監視により、同エリア内の需給バランス変動量を把握し、これをエリア外の広域系統で確保されたセカンダリリザーブとエリア内の蓄電池制御により補償する制御方式が検討されている⁽²⁾。インドでは電力系統の電力品質および供給信頼度が著しく低いため、高品質を要求する工場需要家のために、ディーゼルエンジン発電機を主電源とした自立系統を構成することが検討されている。また、複数の自立系統を相互連系することも試みられている。同自立系統の経済運用を推進するために、複数の発電機間でELDを推進する手法が検討されている⁽³⁾。また、安定運用維持の観点から、合わせて同期安定度、電圧変動、瞬動予備力の確保も考慮されている。日本では従来、一般電気事業者の電力供給の信頼度が非常に高いため、信頼度向上策としてのマイクログリッドの価値は、相対的に低いのではないかと考えられる傾向があった。しかし東日本大震災の経験は、非常時重要拠点を中心として、信頼度対策が日本においても重要な課題であることを再認識させられた。文献(4)では、日本におけるマイクログリッド研究の経緯がまとめらると共に、大震災当時に、東北および東京エリアでマイクログリッドがどのように機能したか、仙台マイクログリッドおよび六本木ヒルズの事例が紹介されている⁽⁴⁾。マイクログリッド内の短周期変動補償を目的として、蓄電池制御の活用が広く検討されているが、一般にエネルギー貯蔵装置は高いため、ここでは空調用ヒートポンプを可制御負荷と捉え、この制御による需給管理が検討されている^{(5)~(7)}。具体的には、経済性ならびに応答性の異なる複数の電源をカスケード制御により統合的に制御する集中管理をベースとした手法がとられている。また、文献(6)では、空調システムに蓄熱槽が存在することを想定した場合について、蓄電池SOC制御と蓄熱槽制御を両立できる制御パラメータ決定方法が議論されている。この制御効果については、実証試験からもその有効性が示されている。さらに文献(7)では、ピークカット対応とされていた空調機を負荷周波数制御の領域にも適用することで、火力発電機と空調機が協調的にLFCの高度化に貢献する手法が提案されている。ここで、空調機の応答性は、負荷の上げる方向と下げる方向とで異なるため、この特徴を考慮することが重要となる。経済性に優れる電源を優先的に活用することで、蓄電池容量の削減を目的とする点は文献(5)や(6)と同一である。また、電気自動車を含むマイクログリッドにおける様々な需給管理手法が紹介されている⁽⁸⁾。特にパラレルプロセッシング方式として、PCC

における系統連系に際して半導体スイッチを活用した方式では、マイクログリッドが主系統から切り離された交流系統と捉えることができ、マイクログリッド内の需給管理と連系線潮流制御を独立して実施できるメリットがある。ただしコストの増加は避けられないと考えられるため、本論文のように交流連系をベースとしたシステム提案は経済的な観点から有効と思われる。電力需給管理の高度化のために、太陽光発電出力の予測は非常に重要な課題である。この高精度化のために、文献(9)では灰色理論とニューラルネットワークを用いた予測手法が提案されている⁽⁹⁾。特に ELD 領域に対応した長周期での変動量予測が対象である。具体的には、全天日射量の変動領域を灰色理論で予測し、予報気温と過去の全天日射量の情報と合わせて入力データとし、ニューラルネットワークを適用する手法となっている。簡易的な手法であるが、1 日平均誤差率で 20% 程度の精度が達成されている。複数のマイクログリッド間における電力の融通は、全体での経済性を向上できる可能性がある。文献(10)では、具体的なエージェントシステムとしての実装方法が詳細に検討され、これに基づいた電力融通の効果が議論されている⁽¹⁰⁾。各マイクログリッドには蓄電池も含まれるため、その充放電制御の戦略の立案が重要となる。このため、問題全体としては混合整数計画問題として取り扱われており、情報通信の枠組みはエージェントベースとして構築されているが、各エージェントの意思決定の在り方は必ずしも分散的では無い点で、本論文とは本質的に異なる。マイクログリッドのような小規模な電力系統においても、この内部での需給管理を市場ベースで行うことは、社会余剰の最大化の観点から有効と考えられる。文献(11)では、このようなローカルな電力市場が構築されたことを想定し、シングルプライスオークションで運営されるスポット市場の原理に基づいて 1 時間ごと 24 時間の電源ディスパッチ（数時間前のゲートクローズ）のスケジューリングを決定する手法が検討されている⁽¹¹⁾。特に各プレイヤーの挙動はマルチエージェントシステムとして実装され、数値解析実験として、その有効性が示されている。

本論文では、マイクログリッド内の需給管理をより柔軟に実現するために、モバイルエージェント技術を活用した相対取引の支援システムとの位置づけとしている。これにより、市場決済のタイミングを待たずして連続的な取引量の調整が可能となるため、より機動的な需給管理を実現できる。また、モバイルエージェントを用いた分散的な処理に基づくことで、耐故障性が向上されている点も利点と考えられる。なお、社会余剰最大化の観点からは、一般論として市場ベースの手法よりも劣るものと思われる。マイクログリッドにおける需給管理については、海外を中心に実証試験サイトの構築による検討が多くなされてきた。例えば文献(11)では、自立運転する 3 つのマイクログリッドを相互連系させておき、非常時には電力融通を実現する枠組みでの検討が紹介されている。

これにより制御のロバスト性および電力供給の信頼性が大きく向上できると期待される。特に需給制御の方式については、primary, secondary, tertiary の3方式の組み合わせにより、瞬動的な対応から経済的な最適化に至るまで、統合的な管理が実現されている。しかしこのような実証試験サイトのほとんどでは、まだマイクログリッド内での電力取引の視点は含まれていない状況にある。再生可能エネルギーを含む自立運転型マイクログリッドでは、事故時対応などの課題も非常に重要であるため、供給信頼度の解析手法や電力貯蔵装置の容量決定手法などが幅広く議論されている⁽¹²⁾。価格シグナルに基づいて電力需要を調整するデマンドレスポンスの枠組みは効率的な需給管理のために非常に重要な技術であるが、この実現にはアグリゲータの事業が有効になると考えられ、広くその行動分析が行われている。アグリゲータは自らの管理対象となる需要家に電力削減等の要請を行うことになるが、その応答性には大きな不確実性が含まれると考えられる。また、外生的な観点からも、再エネの出力変動の増加は、アグリゲータの利益最大化を考える上で重要な要因となる。このようにリスク管理を考慮した利益最大化をモデル化することは重要な課題であり、例えば文献⁽¹³⁾ではモンテカルロ法に基づいた分析手法が提案されている⁽¹³⁾。多数の分散型電源の出力を調整して高速な需給維持制御の実現を目指す場合、中央集中的な運用制御体系の構築により統合的な制御を目指すことが考えられるが、この場合は以下の2点が問題になる。(1) 中央集中的な運用体系を構築するためには高速な情報通信システムの完備が必要であり、分散型電源の台数が多い場合には同システム導入に要するコストが膨大となる可能性がある。また分散型電源の台数が多いと、中央集中的な制御指令を生成するための演算コストも増加し、リアルタイム性の強い制御の実現も困難となりやすい。(2) 一般に分散型電源の所有者はそれぞれ異なると考えられるため、各分散型電源の運用制御の意思決定は、その所有者に委ねられている。そのため、今後の自由化の進展に伴って分散型電源所有者が多様化していくと、中央集中的なシステムを用いて系統運用者が直接分散型電源に制御指令を送出するシステムは、受け入れられにくい可能性がある。以上の問題を解決するためには、個々の分散型電源がマイクログリッド内の需給バランスの状況を監視しながら、経済合理性に従って自らの行動を自律的に決定する“自律分散型の運用制御メカニズム”の構築が有効である。一般に各分散型電源がローカルな情報に基づいて需給制御を実施する論理として、離島などの自立系統では系統周波数の利用が検討されてきた^{(14)~(16)}。これは小規模な自立系統においては、系統周波数が暗に同系統内部の需給バランスを意味するからである。マイクログリッドが上位系統と連系を有する場合には、周波数変動は主として上位系統の需給バランスに依存するため、周波数情報を需給制御に利用できない点が問題となり、連系線潮流

を利用する方式が検討されてきた(15)(17)(18)。また系統周波数や連系線潮流は、単に系統内部の需要と供給の大小関係を示すものであり、当然のことながら各分散型電源の経済性を考慮した適切な需給制御を実現するためには、他の様々な情報が合わせて配信されなければならない。以上の背景の下、本稿では自律分散型システムの実現に向けて、“モバイルエージェント (Mobile Agent: MA) 技術”を活用した新しい需給制御方式を提案する。モバイルエージェントは移動性を有したエージェントプログラムであり、プログラムとデータが共に移動することにより、データだけでなく、処理の実行も分散化できる特徴を有する。これにより、需給制御のように高い信頼性が求められるシステムを分散的に構成する場合に、耐障害性の強いシステム作りが可能になると考えられる。低圧連系の需要家にまで自由化が進展した場合、各需要家は電力を購入する事業者を自由に選択できると考えられる。すなわちマイクログリッド内の需要家に関しては、上位系統を介して一般電気事業者から購入する場合もあれば、マイクログリッド内の分散型電源所有者から購入することも可能である。これらの取引はいずれも相対取引とみなすことができる。本論文の提案手法では、移動性を有するモバイルエージェントが積極的に情報通信システム内を移動し、これら相対取引の仲立ちをすることで電力取引の支援を行う。システム全体としての望ましい電力取引結果は、マイクログリッド内にローカルな電力取引市場が形成されたことを想定し、原理的にはこの均衡解になると理解できる。しかし、再生可能エネルギー電源の出力変動の影響で頻繁に状態変化するローカル市場をリアルタイムに管理することは困難であるため、本提案システムの目指すところは、ローカルな相対取引の積み重ねで高速に市場均衡解に近い取引を実現することにある。以下に本論文の構成を示す。まず第 2 章では、分散型電源の普及拡大と、これに伴いマイクログリッドに要求される事項について示す。次に第 3 章では、マイクログリッドの需給制御手法に関する概要と、本論文での考え方を示す。第 4 章ではマイクログリッド内の可制御な分散型電源群を対象とした、電力取引支援システムの提案を述べる。ここでは先に、提案方式の基礎的な事項を明確に示すために再生可能エネルギーの存在は考慮せずに、可制御な分散型電源群の供給力調整を対象として本提案手法の基本動作を説明した後、再生可能エネルギーが含まれる場合の対応方法を示した。大容量の再生可能エネルギー電源が含まれる場合には、環境面への配慮からこれを優先的に活用することを考える必要があるが、全量買取制度の下で上位系統に向けて大容量の売電を行うと、上位系統との連系線に混雑の生じる場合がある。このような状況下で再生可能エネルギーの所有者が需要家や分散型電源所有者と適切に協調しながら、再生可能エネルギーの出力を有効に活用するための方法論を示す。提案方式の有効性や特徴は第 5 章の数値計算で確認し、最後に第 6 章で

全体をまとめる。

第2章

分散型電源とマイクログリッド

2.1 分散型電源の普及拡大

エネルギー・環境問題の解決に向けて、太陽光発電や風力発電などの再生可能エネルギーの普及拡大は非常に重要なキーテクノロジーとして期待を寄せられ、ここ十数年ほどの間に世界的に大きく進展してきた。欧州では **Feed In Trariff** 制度の導入に伴い、風力発電や太陽光発電の導入が飛躍的に拡大した。例えばドイツでは、既に太陽光発電と風力発電を合算した合計の導入量は kW ベースで系統容量（ピーク負荷に相当）を超過する容量となっている。当然のことながら、これらの電源の出力には大きな不確実があるため、再生可能エネルギーのみでピーク負荷を賄うことは現実的では無いが、総容量という数字だけから見ると、すでに系統容量がカバーされている地域があることは、ここ十数年にわたり非常にラディカルにパラダイムシフトが進展してきたことを如実に物語っている。

このような世界的な流れの中で、日本では太陽光発電の導入拡大が再生可能エネルギーにおける主要な開発目標と位置付けられ、2030 年時点で 5300 万 kW などの数字が長らく掲げられてきた。しかし近年では、2014 年頃から顕在化した「接続保留」問題に見られるように、**Feed In Tariff** 制度の不備とも言うべき点に基づいた大量の接続申請が相次ぎ、実態を伴わない見込みの導入量が著しく拡大したことが問題となっている。この申請ベースによる普及拡大の見込み量は、一部の電力会社の管轄系統ではピーク需要を上回る容量にまで拡大しており、決して計画的とは言えない再生可能エネルギーの導入拡大の先行きが危ぶまれている状況である。歴史的には、再生可能エネルギーの導入拡大のための方策としては RPS 法（**Renewable energy Portofolio Standard**）の適用が先行しており、経済性や環境性をにらんだ計画的な普及方策が検討されていたが、**Feed In Trariff** 制度の適用は急速な普及を実現させるための、いわば劇薬としての位置づけと考えられる。太陽光発電を中心とした産業促進などの観点にも重きがあり、その導入の成否に関わる正当な評価は容易なことではないが、徐々に太陽光発電の普及拡大が進むにつれて、世界的にも「太陽光発電や風力発電産業は未成熟というべき時期を過ぎた」との考え方から、市場価格に連動したプレミアム価格を上乗せする **Feed In Premium** などの方式へ移行することが、

今後の世界的な潮流になりつつある。日本でも政策面の見直しは経済産業省を中心に幅広く議論されているところである。

一方で、分散型電源としては再生可能エネルギーの存在感が大きいところではあるが、その他の分散型電源の普及拡大も非常に重要である。小規模分散型の回転機としては、離島などにおける電力供給の主力として活躍しているディーゼルエンジンや、コジェネレーションとして活用することでエネルギー利用効率の向上が期待できるガスエンジンやマイクロガスタービンなどの普及が期待される。一般に熱エネルギーの輸送には大きなロスが生じるため、排熱の有効利用に関しては電源近傍での利用を主とすることが優位となりやすい。したがってこれらの分散型電源を中心として高いエネルギー効率を実現するエネルギーシステムを構築する場合は、比較的ローカルなエリア内でのエネルギー利用が主となることが想定される。本論文で検討の主要な対象となるマイクログリッドも、このような位置づけと考えることができよう。

さらに近年では、水素エネルギー利用の幅広く期待されている。まだ研究段階にある技術が多いのが現状ではあるものの、再生可能エネルギーを利用した水素の生成、輸送、利用技術は近年目覚ましい進展を遂げており、今後、燃料電池への応用を含み、エネルギーシステムにおいて重要な役割を担うことが想定される。以上の通り、分散型電源の技術革新は多岐にわたるが、本稿ではこのような多様なエネルギー源をマイクログリッドとして一つのエネルギーシステムに統合した場合を想定し、ここで必要となる需給制御技術を提案していくことになる。

2.2 電力系統における分散型電源と諸課題

太陽光発電や風力発電などの再生可能エネルギーは、前述の通り気象条件に依存して出力が変動する不確実性を有するため、普及拡大が進展した電力系統では、安定運用維持の観点から様々な技術課題が生じる。まず検討しなければならないのは、需給バランスの維持である。一般に電気エネルギーの貯蔵は技術的に容易では無く、各種蓄電技術の進展は目覚ましいものの、まだ非常に高価であるのが現状である。したがって、同時同量の原則の下で需給管理を行うことが、少なくとも当面は、不可欠であると言える。再生可能エネルギーの不確実性に対処することを想定すると、従来の電力需給制御技術に基づくと、主に以下のような要因を検討する必要がある。

(1) 再生可能エネルギーの出力予測技術の適用

風力発電や太陽光発電の出力変動は、直近の出力変動の履歴や前述の平滑化

効果を見込むことで、ある程度の確度をもって予測することが可能である。実運用断面に対して、1 日前、数時間前、15 分前など、さまざまなタイミングにおいて逐一出力変動の予測を行うことで、より適切な調整力の確保などが実現できると考えられる。

（２）在来電源の調整力の確保

日本における現状の電力系統では、ELD（経済的負荷配分制御）や LFC（負荷周波数制御）などの既存の需給調整技術に基づいて、電力系統側の保有する在来の大規模電源群の出力を調整することで、主として需給管理が実現されている。再生可能エネルギーの普及拡大時にも、この制御体系に基づいて需給管理が行われることを想定する場合、従来の制御体系に比較すると再生可能エネルギーの出力変動を含む需要変動の様相が異なってくると考えられるため、制御側のメカニズムにも新たな革新の必要が生じると思われる。すなわち、見かけの需要変動が従来とは異なる周波数スペクトルを有すると分析できる場合、各周波数成分ごとに、これに見合った調整力を確保することが重要となる。例えば LFC が主として制御対象とする周波数領域は、従来は数分～数十分程度と考えられているが、この領域を見直す必要性や、同周波数領域での調整力をより豊富に確保する必要性が考えられる。ここで、所望の調整力を確保するための要因も多角的に議論する必要がある。まず分かりやすいのは容量の確保であるが、他にも発電機出力の変化率制約にも上限値があり、この観点から至近の数分、数十分、数時間の間における調整幅は、容量の意味での上下限制約よりも厳しく制約されることとなる。各電源の動特性は互いに異なる点にも注意が必要である。このような各種要因を適切に考慮して然るべき最低限の調整力を確保することは、非常に高度な解析技術を要求する技術課題である。

（３）再生可能エネルギーの出力抑制技術の適用

自然エネルギーを利用する発電技術は、一般に気象条件により定まる最大出力を超過して発電することは困難であるが、逆に出力を抑制することは比較的容易である。例えば風力発電の場合は、ピッチ角の制御によりブレードが風力エネルギーを素通しすることで出力抑制が可能であることは、容易にイメージができる方法である。太陽光発電の場合も、太陽光パネルに印加される電圧レベルを調整することで直流での発電量を抑制することができるため、高速に出力抑制することが可能である。再生可能エネルギーの導入拡大が進展した場合には、軽負荷時に再生可能エネルギーの出力が増加した際に系統側電源の下げ方向の調整力が不足することが懸念されている。いわゆる、「下げ代不足」の問題である。再生可能エネルギーの出力抑制技術は、効果的に発動することがで

できれば、この下げ代不足問題を本質的に解消できるものである。経済産業省でも資源エネルギー庁管轄の系統ワーキンググループにおいて、下げ代不足の観点を軸とした太陽光発電ならびに風力発電の最大導入可能容量の問題が議論されてきたが、ここでも出力抑制の日数等に制約を設ける形で、この許容範囲の中でどれだけの太陽光発電および風力発電が導入できるか、という観点から議論が進められていた。一見すると出力抑制をかけることに大きな問題は無いように感じられるが、現実には需要家間の公平性を考えながら、必要な時間帯に必要なだけ（最小限の量にて）出力抑制を行うためには、各再生可能エネルギーに対して個別に精緻な制御指令を送る必要があることに気づく。このような情報通信インフラは現状では未整備であるため、電源所有者間の平等性が担保されるように然るべき法制度化を進めると共に、新しい情報通信システムの整備を検討することが系統ワーキンググループとしても喫緊の課題として認識されていたところである。なお、このような電力系統の運用者と再生可能エネルギー電源側が密に通信し、必要に応じて協調的な制御を実施する方式は海外では既に多くの事例がある。例えばスペインでは再生可能エネルギー電源の管理を主たる対象とした指令所（CECRE）を設立し、ある一定以上の規模の風力発電所の状態監視を行うと共に、必要に応じて制御指令を送出できる枠組みが実現されている。このように系統と風車間での協調的な運用制御体系が構築されていることが、風力発電の普及拡大に大きく貢献していることが実情である。

出力抑制技術は供給力が過剰であるときにこれを抑制する技術との理解が第一ではあるが、常時出力をある一定量抑制しておくことで、逆に供給力が不足する際にこれを増加させる活用法もあり得る。例えばドイツにおける事例として、上げ方向および下げ方向の双方について、出力抑制を的確に活用することで、変化率を所望の制約以下に制限する技術が開発されている。

（４）広域運用の拡大

日本では、地域ごとにTBC（Tie-line Bias Control）に基づいた周波数制御が実施されており、各電力会社管轄地域ごとに独立して需給バランスの維持制御が進められている。しかし各地域ごとに自然エネルギーの分布状況は異なること、また平滑化効果は広域での再生可能エネルギー電源出力を合算した方がより顕著に表れることを考慮すると、交流連系する電力系統においては、できる限り連系系統全体で需給管理を行う方が効率的であると考えられる。この背景の下、日本では電力システム改革の一環として、従来の電力系統利用協議会が廃止されると共に、2015年4月より広域系統運用推進機関が誕生した。このような枠組みの改革に伴い、今後連系線を有効に活用しながら、日本全体で再生可能エネルギーの発電電力を効果的に活用する方策が進展していくことが期

待される。

（５）電力市場の改革

特徴の異なる様々な電源所有者が今後増加していく中で、需給バランスの調整における電力市場の役割も一層重要になることが期待される。電力会社の保有する電源が供給力において大きなシェアを占める場合は、その経済的な出力配分を定めることが主要な課題となるが、そうでない場合には、電力市場の活用は電力供給の経済性を追求するために非常によく機能すると考えられる。日本における電力市場改革では、2017年4月より従来の日本卸電力市場（JEPX）における当日スポット市場のゲートクローズが4時間前から1時間前へと変更される予定がある。これもより実需給に近い断面でディスパッチを定めることにより再生可能エネルギーの不確実性の影響を緩和し、より太陽光発電の普及拡大に柔軟に対処し得る電力市場の形成が期待できる。

一方で、より風力発電の導入拡大が進展している欧州では、電力市場の役割もより多岐にわたっている。例えば、前日および当日のスポット市場に加え、実需給を管理するための調整力市場のメカニズムは大きく進展しており、制御対象の変動周期に合わせて **primary, secondary, tertiary** 等の区分ごとに需給の最終調整が市場ベースで実現されている。これらの市場は、多くの国や地域で15分前等の比較的実需給の直前の断面まで開かれており、インバランスの解消が経済原理に基づいてよく推進されていることが窺われる。

（６）蓄電池ならびにデマンドレスポンスの活用

電力系統における蓄電池の利用は、まだ比較的高価と考えられることは前述の通りであるが、少なくとも技術的な観点からは、不確実な再生可能エネルギーの出力を効果的に活用、もしくは補償するために、蓄電池技術が有効であることは言うまでもない。電力系統全体での需給バランス維持に貢献するための系統用蓄電池の研究開発も近年意欲的に取り組まれており、将来技術として広く活用される可能性も考えられる。また、将来の普及が見込まれる電気自動車に搭載される蓄電池の充放電制御を活用する方策も考えられる。この場合は蓄電池の系統貢献は本来の導入目的とは異なる、いわば二次利用であるため、コスト面の問題は相対的に小さい。このような電気自動車の制御等も含めて、需要家サイドが電力系統の需給制御に貢献する枠組みがデマンドレスポンスとして構築されれば、その効果は非常に大きいと想定される。ただしこの場合も、的確に需要サイドを制御するための情報通信インフラの整備や法制度化が大きな課題であることは出力抑制の項で述べたことと同一である。

電力系統における需給バランス維持のメカニズムに着目した場合の課題や対策については、大まかには上記のような観点が挙げられる。一方で良く知られているように、太陽光発電や風力発電の導入は電力系統内の潮流や電圧の管理面からも大きな問題を引き起こし得る。ただし本稿では需給管理技術が検討の主眼であるため、これらの問題については言及しないこととする。

2.3 分散型電源と協調する新しいシステム技術

大量の分散型電源を効率よく電力系統に統合するために、近年ではスマートグリッドならびにマイクログリッドに代表されるような、インテリジェンス性を備えた新しい電力ネットワークの構想が進められてきた。近年特に注目されてきたスマートグリッドのコンセプトは非常に幅広いが、概ね情報通信技術を電力系統技術に融合させることで、電力系統の高度利用を推進する意味合いで活用されている。世界的にスマートメータの普及拡大が進んでいるが、このスマートメータの活用により電力系統の状態監視を高度化すると共に、この取得情報を活用したよりアクティブな系統制御に特徴を有することが多い。世界的には、前述の通り系統運用者が風車等の再生可能エネルギー電源と情報通信インフラを介した双方向通信を行うことで需給管理を高度化する方策が進められているが、このようなあり方も一つのスマートグリッドと言えよう。スマートメータの普及により同様の概念が精緻に実現でき、各地域ごとのローカルな系統問題と連系系統全体でのグローバルな課題がシームレスに対策できるような系統技術を実現することが、一つの究極的な目的と考えられる。

一方でマイクログリッドは、各地域に形成される高機能化されたローカルな電力系統と考えられる。離島に形成される電力系統もマイクログリッドと呼ばれる場合があるが、これを除けば、マイクログリッド主に以下のような利点の下に構築されてきたと考えられる。

(1) 信頼度対策としてのマイクログリッド

米国の電力系統など、相対的に基幹電力系統の供給信頼度が低い国や地域においては、頻発する供給支障に対して個別の需要家が十分な対策を行うことが重要であった。ただし個別の需要家ごとに非常用発電機などの分散型電源を所有することは全体最適の観点からは非効率とも考えられるため、地域単位で自立運転へ移行できるシステムの構築は、経済性と信頼度向上を両立する一つの解になり得るものである。

(2) エネルギーの高効率利用のためのマイクログリッド

前述の通りコージェネレーション発電機は熱エネルギーもくまなく利用することで、エネルギー利用の総合効率を大きく向上することが可能である。一方で需要家個別の排熱利用では、必ずしも熱需要の様相がタイミングおよび総量は排熱の発生と合致しないため、効率的な利用には限界がある。そこで地域や建物単位でのマイクログリッド構築により、熱エネルギーを柔軟に需要家間で融通してエネルギー利用の総合効率を高めることは、マイクログリッド構築の一つの重要な目的である。

（３）再生可能エネルギーの出力変動対策としてのマイクログリッド

再生可能エネルギーの導入容量が比較的少なかった頃は、地域で発生した電力は同地域近傍で消費する「地産地消」の考え方により、再生可能エネルギーの出力変動の影響をローカルなエリア内に局限化する概念が、マイクログリッドの一つの価値として認識されていたように感じられる。しかし近年では世界的に再生可能エネルギーの普及拡大が進展したことにより、むしろローカルエリアごとの出力変動は個別に打ち消す必要は無く、まず上位系統に変動分をそのまま返し、系統全体での平滑化効果により高周波変動成分を除去し、その後自然な変動補償を実施すればよいとの考え方が主流となりつつある。もちろん電圧変動などのローカルな問題が再生可能エネルギーの出力変動により引き起こされる場合はこの限りでは無い点に注意を要する。本稿では電力系統全体での需給管理の観点としては、マイクログリッドの必要性を主張するものではないが、一方で PCC の連系容量は限られている点に着目する。通常はマイクログリッドは PCC の一点で電力系統と接続する形態が多くとられるが、この容量を可能な範囲で低減させることは、設備形成の低コスト化の観点からは有意義な方策の一つと言える。このとき、マイクログリッドは自系統内の需給バランスを極力一致させるように働くことで、連系設備（PCC）にかかる負担を減少させ、効率的な設備形成に資することが期待される。

以上のようにマイクログリッドに期待される役割は地域ごとに多様であるが、本稿では上記（３）、特にマイクログリッド内の効率的な需給制御技術の検討について進めていく。

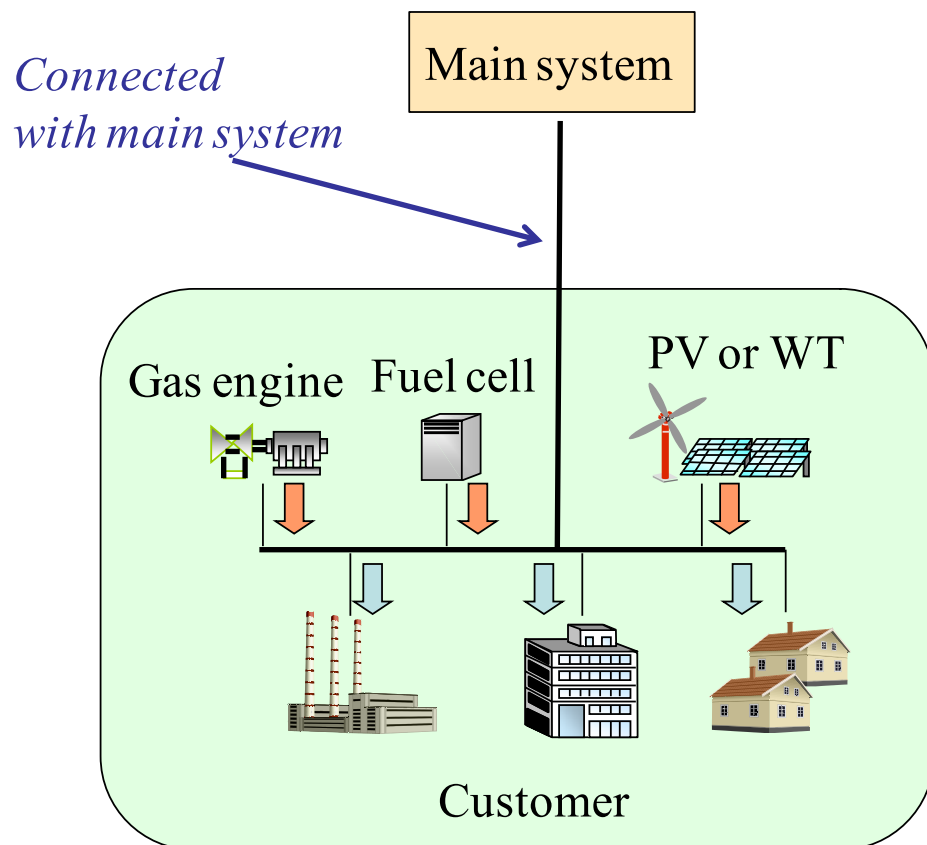


図 2.1 マイクログリッド

第 3 章

マイクログリッドモデル

3.1 マイクログリッドモデルの概要

分散型電源の普及に伴い、将来的に供給の大部分を分散型電源のみによって賄うようなローカルな系統が構成される可能性がある。ここで分散型電源としては、再生可能エネルギーおよび可制御型の分散型電源を想定する。マイクログリッドに代表されるこのような系統では、可制御な分散型電源の運転パターンが負荷や再生可能エネルギーの出力変動と協調していなければ、上位系統からの供給電力が大きく変動する可能性がある。逆に、分散型電源が負荷変動と協調した運転を行えば、上位系統から見て負荷率の高い地域とみなせる可能性がある。さらに、ローカル系統内に設置された分散型電源が供給力として期待できる（協調運転が行われている）場合には、上位系統とローカル系統間の連系線の容量は小さくできるはずである。しかし、電力市場の規制緩和も進む中、一般的に分散型電源が一つの電力事業者に所有されるものではないため、負荷変動と協調した運転を行うことが難しい。したがって、従来とは異なる新しい制御方式を確立する必要がある。本研究では、次章に述べるようなモバイルエージェント（MA）を用いた制御によって、分散型電源を負荷変動に協調させて運転することを考える。そのモデルとして、図 3.1 に示したような、ローカル系統内の分散型電源の総容量がピーク負荷よりも大きく、連系線容量が比較的小さいケースを想定する。PPS（Power Producer and Supplier）が個別の需要家と契約するイメージを持つ際には、同時同量の概念に基づいて 30 分など、ある一定の期間における需給バランスが維持されるように供給力が調整されることが多く行われる。これはより短い周期での変動分は広域の電力系統全体で見れば、非同期な成分が多数存在するため互いに打ち消し合う平滑化効果があるため、経験的に個別に変動補償をかける必要性が無いためである。しかし物理的な送電容量制約下で運用を実現したい場合は、この送電容量制約を定める設備が過潮流等に耐えうる時間を考えて、これに合わせた管理が重要となる。

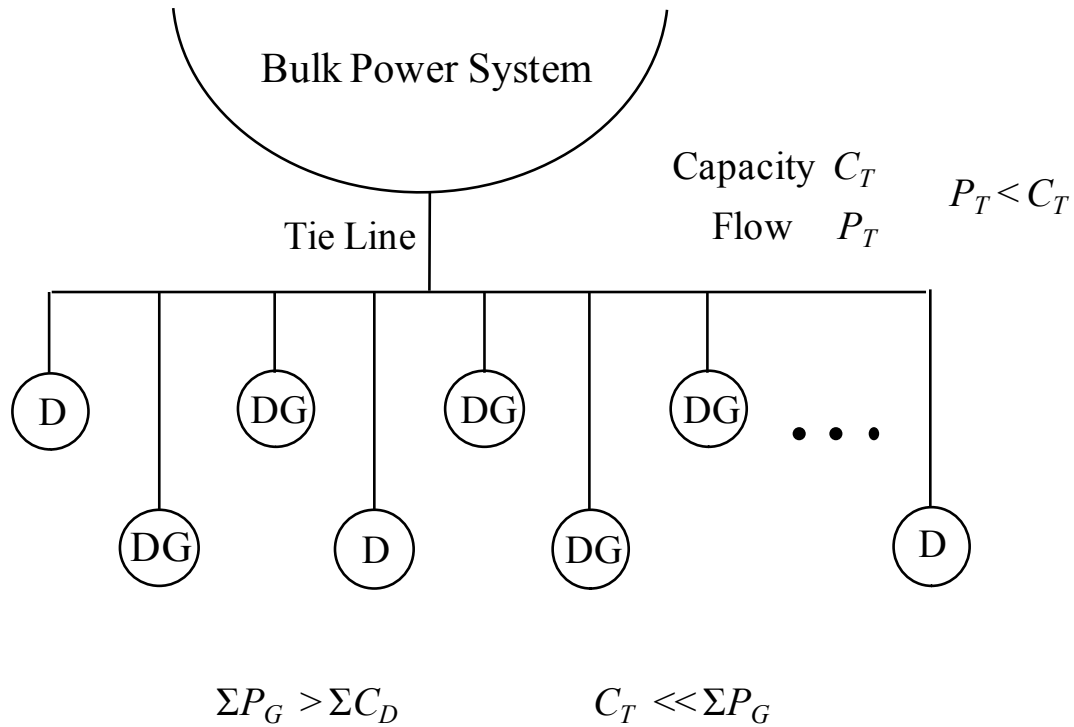


図 3.1 モデル系統

3.2 電力市場による中央集中型需給運用方式

本論文の主眼は「モバイルエージェント技術」の適用により自律分散型の新しい需給制御システムを構築することであるが、この比較対象として、マイクログリッド内の需給管理を市場取引にて決定する中央集中的な運用方式を想定する。本稿での提案方式は再生可能エネルギーの出力変動の不確実性にも対処できるよう、応答の高速性が問われるものである。この比較対象として、ゲートクローズが理想的に実運用断面に一致するような調整力市場のモデルを想定する。現実には電源側の出力制御の遅れ等があるため実現は不可能と思われるが、非常に高速に入札から決済までが行われる電力市場を想定することで、その需給運用点は各電源の経済性を加味した理想的な定常状態を表すことになると考えられる。この理想的な定常状態をつなげたものを、本提案手法の比較検討対象として用意することが趣旨である。ここで、本来、中央集中的なシステムを構築するためには高速な情報通信網が必要になると考えられるが、通信面の問題は言及しないこととする。したがって、通信速度や通信負荷は考慮せずに、非常に短い時間間隔での市場取引の清算が可能であるとした。市場取引の清算方法は入札によるものとし、強制プール型の市場をモデルとする。

まず、各 DG 所有者が各々任意の入札を行う。最低入札価格と最高入札価格

を決定し、供給可能量に対して一次曲線で入札価格と入札量を設定した（図 3.2 中の黒線：ある DG 所有者の最低入札価格を a_1 ，最高入札価格を a_2 とし，以降同様に b_1, b_2, \dots とする）。その入札データを基に供給曲線（図 3.2 中の赤線）が作成される。一般的には，同じ過程で需要曲線も作成されるが，本論文では需要の価格弾力性は 0 とし，需要曲線は図 3.2 中の青線のような直線とする。このような前提としたのは，後述のように提案手法においては，需要家が電力を積極的に購入する行動は考慮していないためである。（DG 所有者は電力を売る価格を自由に選択できるが，需要家は電力を買う価格を自由には選択できない）つまり，市場取引において買い入札を考慮しないこととなる。最後に，需給均衡価格（clearing price）が供給曲線と需要曲線の交点によって決定する。各 DG 所有者はこの需給均衡価格に対して，自身が入札した分の出力をすることとなる。

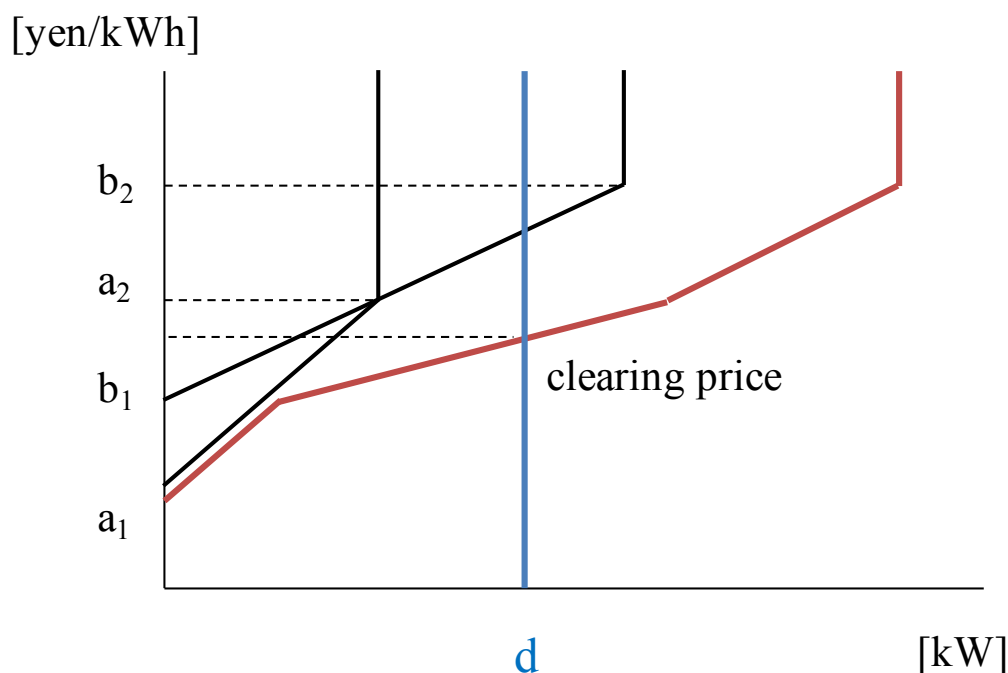


図 3.2 入札と需給均衡価格

3.3 モバイルエージェント技術による自律分散型需給運用方式

電力市場を介した需給運用では，ザラバ方式など決済までのプロセスを高速化できる方法も適用し得るが，それでもある一定の中央集散的な情報通信シス

テムの構築が必要であり、かつ需給管理に伴う時間遅れもそれなりに大きなものとならざるを得ない面がある。平滑化効果の期待できないローカル系統において再生可能エネルギー電源の不確実性に対処するためには、より応答性および柔軟性の観点から優れた管理手法の適用が望まれる。また、需給管理システムは連系設備を過潮流から保護する重要な役目も担っているため、耐障害性も非常に重要な要因となる。そこで本研究では、自律分散型システムを柔軟に実装するための技術として有用なモバイルエージェント技術に着目し、これを活用して分散型電源所有者と需要家間における相対取引の速やかな締結を支援する需給制御手法を提案する。モバイルエージェントは、自律的に“移動・複製・実行・消滅”等の動作が可能なエージェントプログラムである。データだけではなく、プログラムごと可動性を持たせることにより、計算機リソースを良く分散させて資源の有効活用が期待できると共に、一部のシステムがダウンした場合でも残りのシステムは継続して稼働できるような設計が組みやすいと考えられる。図 3.3 にそのコンセプトを示す。このモバイルエージェントに需要家と DG 所有者間の電力取引の仲立ちの役割を持たせる。

MA(モバイルエージェント)

自律的に“移動・複製・実行・消滅”等の動作が可能な
エージェントプログラム



図 3.3 モバイルエージェント

第 4 章

MA 技術による需給制御方式

4.1 可制御 DG 群による需給制御

一般に DG の発電効率は在来の大規模電源群と比較すると低いと考えられるが、排熱も有効利用するとエネルギーの総合効率が増加し、大規模電源に比較して経済性が良好となる場合がある。本研究におけるマイクログリッドモデルでは、可制御 DG はマイクログリッド内の需要家を対象に取引する場合には排熱も十分に活用することができ、大規模電源に比較して十分に競争的な発電単価が実現できると仮定する。一方で、需給維持の技術的な側面からは、マイクログリッドは自系統内の需給バランスの変動をできるだけ抑制し、上位系統から安定した電力需要（もしくは電源）に見えるようにふるまうことが、一つの目標とされてきた。以上のような背景の下、マイクログリッド内の需給運用の指針として以下の 2 点を考える。

- ・ マイクログリッド内の需要家と可制御 DG との間で、できる限り多くの電力取引が成立するように促す。また市場取引の均衡解で示されるように、マイクログリッド内の需要家と DG 所有者の余剰の総和が最大化されるような価格の決定を目指す。
- ・ 電力需要の変動に対して、できる限り高速に供給力が調整され、常時需給バランスが維持されている状態を目指す。ただし、過度に早い成分までを完全に補償する必要はない。なぜなら、複数のマイクログリッドの存在を考えると、個々のマイクログリッドの需給変動は高周波成分に関しては互いに無関係と想定できるため、完全な補償を実施しなくても、互いに打ち消し合う“ならし効果”が働くことが期待できるからである。

以上のコンセプトの下、本研究では図 4.1 のように DG が大量に導入され、DG の総容量が需要を満たしているマイクログリッドを想定して検討を進める。ここで、すべての DG を系統運用者が制御している場合、電源運用の立案・実行の流れは一例として、以下のような方式が提案されている⁽¹⁹⁾⁽²⁰⁾。

＜電源運用の立案・実行のフロー例＞

(STEP 1) DG の出力，電力需要，熱需要を 1 週間前に予測し，各 DG の週間の運用計画を作成する。

(STEP 2) STEP 1 の運用計画が当日の DG の出力や需要に基づいて修正される。

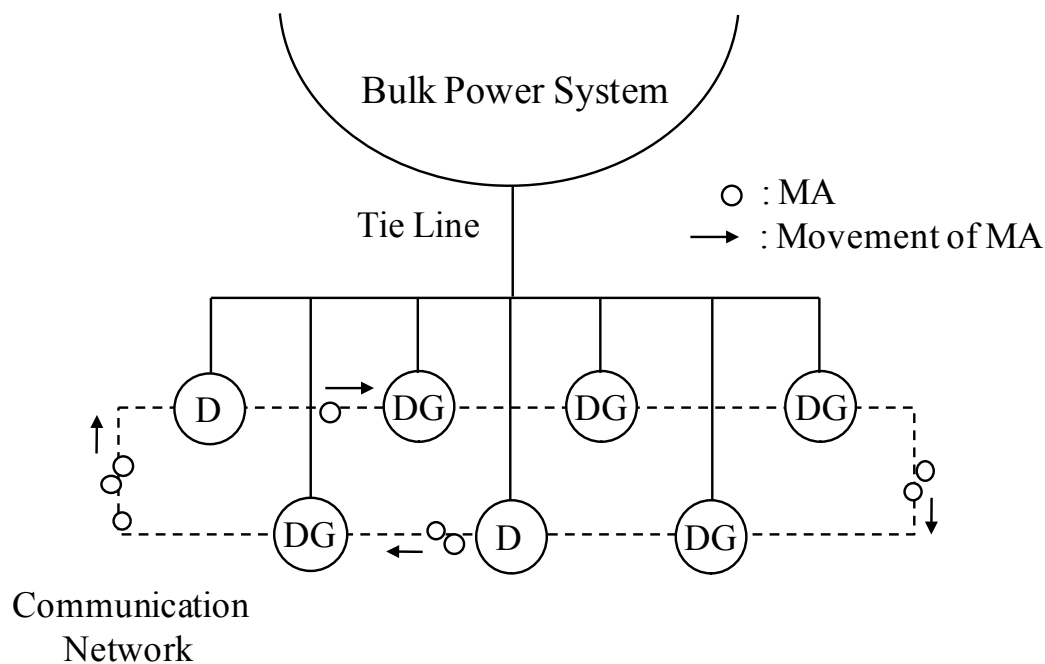


図 4.1 マイクログリッドモデル

1 時間毎にユニットコミットメントや経済負荷配分が最適化計算を用いて見直される。

(STEP 3) リアルタイム制御として、応答速度の速い電源を中心に供給力を調整し、需給バランスの維持を目指す。また電力貯蔵装置が含まれる場合には、その充放電制御により連系線潮流変動の平滑化も行う。

一方、DG の所有者がそれぞれ異なることを想定すると、系統運用者が DG 群を集中制御することは難しい。この場合は以下の手順が、一つの効果的な系統運用の手法であると考えられる。

＜DG 所有者が異なる場合の運用フロー例＞

(STEP 1) 経済的かつ体系的に、1 日前市場にて負荷配分が決定される。

(STEP 2) 当日の需要と供給の不均衡が相対取引にてリアルタイムに解消される。

(STEP 3) 電力貯蔵装置の充放電が、連系線潮流を基準値に維持するために制御される。

本論文では＜DG 所有者が異なる場合の運用フロー例＞の STEP 2 に焦点を当て、MA 技術を含むマルチエージェント技術に基づいた制御方式に着目する。MA は移動性を有するエージェントプログラムであり、自律的に移動・複製・実行・消滅等の行動が可能である。本研究で提案する需給制御方式では、この MA に相対取引を仲介する役割を持たせることを検討する。具体的なコンセプトは、以下の通りである。まず、マイクログリッド内では 30 分同時同量の考え

方に代表されるように、ごく短時間の需給変動は大きな問題にならないものと考えて、先に需要家が電力消費を行う。その直後に MA 技術を活用して、需要家はマイクログリッド内の安価な電源と後付けで電力取引（相対）の交渉を行うことを目指す。MA が速やかにマイクログリッド内の DG と決済ができれば、マイクログリッド内の供給力が追従することになる。提案手法は以下の 5 つの段階に分けられ、(STEP 1) から(STEP 4) までを図 4.2 に示す。

<提案手法 フロー1>

(STEP 1) 各需要家は $1\text{kW}\cdot\text{minute}$ (1kW の出力を 1 分間継続した電力量) 消費する毎に、MA を情報通信ネットワーク内に 1 つ送出する。MA には需要家が任意に決定した価格情報が付与される。これは需要家側が DG 所有者に向けて提示する買電価格を表す (Fig.2 では kWh 換算での価格で示す)。

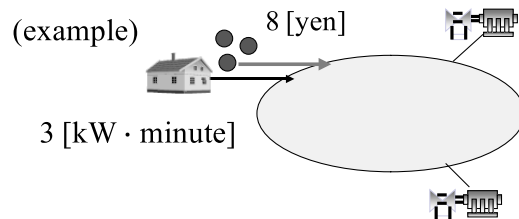
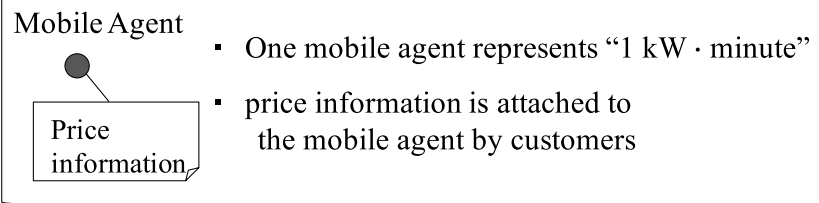
(STEP 2) MA はマイクログリッドの情報通信ネットワーク内を動き回りながら、各 DG に対して買電価格を提示して、相対取引を持ちかける。買電価格が低い場合にはいずれの DG 所有者も取引を行わないことが予想されるため、これに備えて MA は買取価格を時間の経過に沿って上昇させるメカニズムを有する。

(STEP 3) 各 DG 所有者は巡って来た MA の価格を調べ、利益を最大化できると判断した任意のタイミング (少なくとも DG の燃料コストより高いことが必要。Fig.2 では、上側の DG が kWh 換算の価格で 9 [yen] と設定) において MA を取得する。

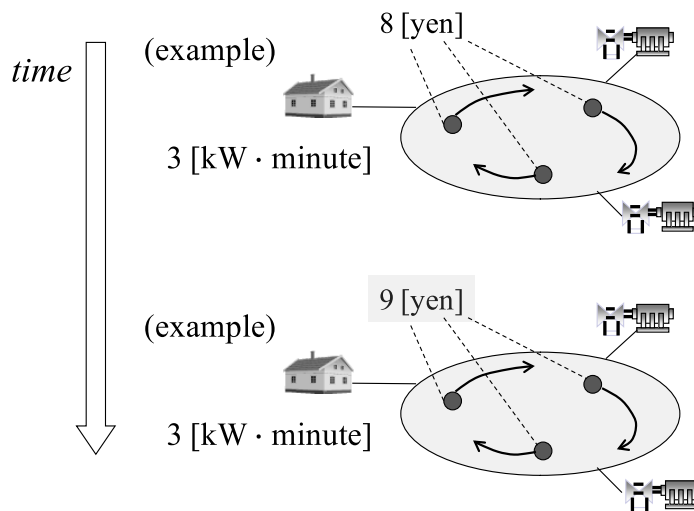
(STEP 4) MA が DG 所有者に取得された時、MA を送出した需要家と取得した DG 所有者間で相対取引が成立する。この時、DG 所有者は $1\text{kW}\cdot\text{minute}$ 出力し、需要家は MA の価格で決定される電力価格を支払う。なお DG 所有者に取得された時点で、MA は情報通信システム上からは消滅する。

(STEP 5) MA が DG 所有者に取得されないまま価格が上昇し続けると、最終的には連系線を通じた電力会社からの買電価格を超過することになる。この場合、需要家には MA を取得される誘因が存在しないため、MA は消滅し、当該需要家の消費した電力は電力会社から購入したこととなる。したがって、連系線を通じた電力会社からの買電価格が、本システムにおけるプライスカップとして働く。上記の通り、MA は相対取引を仲介するために、各 DG 所有者を巡回して積極的に価格提示を行う役割を果たす。本来このような価格の提示は、MA の利用によりデータとプログラムの双方が移動する形式としなくても、データの移動のみで対処が可能である。しかし本稿では、以下の理由により MA としての機能を想定したシステムを提案する。

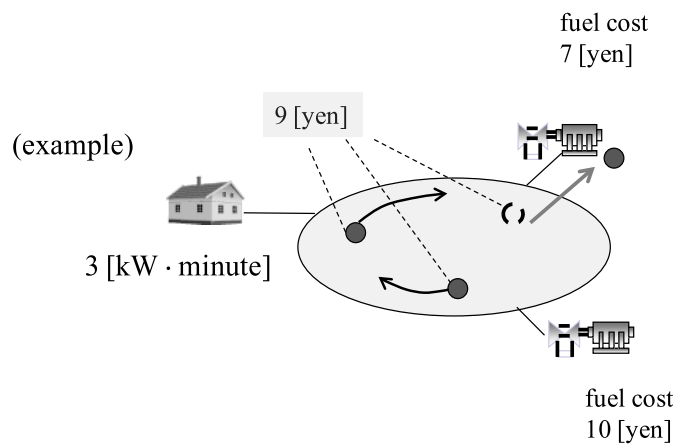
- ・ 電力供給は社会基盤を支える重要インフラであることから、高い信頼性が求められる。マイクログリッドの需給制御は電力供給の信頼性にも直結しうる重要な技術であるが、MA 技術によりその処理の分散化を進めることで、一



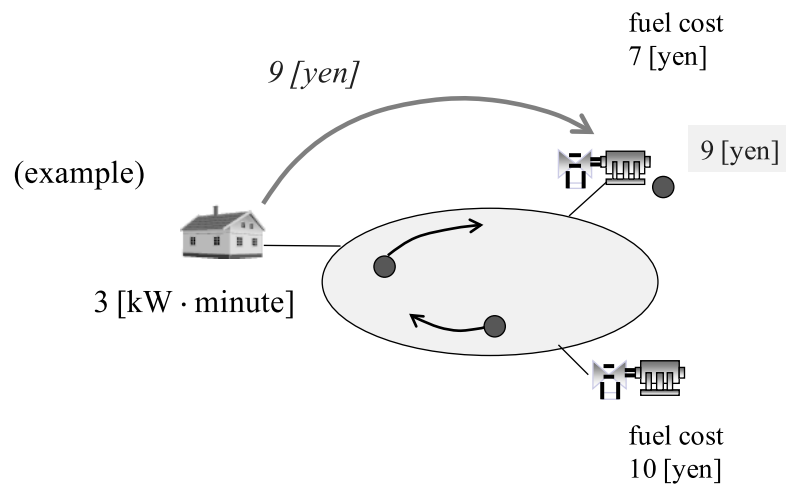
(a) Step 1



(b) Step 2



(c) Step 3



(d) Step 4

図 4.2 需給制御の構成

部のシステムに不具合があるときでもデータの処理を共に移動するプログラムが実行できるため、システムの信頼度を大きく向上させることができる。そのため耐障害性に優れたシステム構築が可能となる。

- より速やかに、条件の良い相手と電力取引を締結するためには、状況に合わせて柔軟に交渉相手を変更することや、過去の学習データの活用が重要となる。MA の機能は、このような機動的な交渉を実現するために適した枠組みである。

なお、ここで以下の点にも注意を要する。

- STEP 1 における初期価格の決定、STEP 2 における MA の移動および価格上昇の方法に関しては、いずれも需要家が主体的に決定することができる。STEP 1 における初期価格の決定は、需要家が直接的に指定することも考えられるが、STEP 2 に関しては、既に MA が需要家の元を離れているため、状況に応じて MA は自律的に行動を調整できる。
- 上記では 1 つの MA は $1\text{kW}\cdot\text{minute}$ の価値を有するものとしているが、この電力量はシステム設計のポリシーに応じて自由に調整が可能である。小さい電力量で定義するほど、より精緻な制御が可能となるが、逆に MA の総数が増加するため、情報通信システムにかかる負担が増大する問題も生じる。本提案システムの実装に際しては、需給制御に求められる性能とシステムにかかる情報通信処理の負荷の観点から、取り扱える MA の総数を決定し、これにより MA の単位電力量を定める必要がある。
- 本提案手法では、需要家がまず電力を消費し、これに続いて MA が送出される。そのため原理的に供給力は後から追従するため、需給制御には遅れが生

じることになる。この遅れによる需給不平衡分は、上位系統により補償されることになるが、前述の通り早い変動成分に関しては完全に補償する必要は低いと考えられる。これは一般に、マイクログリッドの連系線管理の在り方が 30 分同時同量などの考え方で規定されていることから理解できる。上記のような同時同量の下でも需給変動が問題になる場合には、当該のマイクログリッドは系統運用者に対し、需給変動補償に要する費用を負担する必要があると考えられる。

- 本提案システムにおける MA の常駐先は、DG 所有者端の計算機上を想定する。需給の問題はセキュリティの問題を多く含むため、その保全が不可欠な課題となるが、本稿では検討の対象外とする。なお上記提案フローの STEP 4 および STEP 5 に示した通り、MA は取引の終了や価格の規定値以上の上昇により自律的に消滅する。このため、システム上に無限に MA が滞留してしまうような問題は生じない。

4.2 需要家と DG 所有者の行動モデル

MA の提示する買電価格は時間の経過とともに上昇することが期待されるため、各 DG 所有者は MA 取得のタイミングを遅らせて高い価格で売電することで、自己の利益を増加させることが可能になる。しかし一方で、MA 取得タイミングの遅延は他の DG 所有者に MA を奪われるリスクを負うことにもなる。

また逆に、需要家は低い価格で決済されることを期待して、非常に低い初期価格で MA を送出する可能性もある。しかし意図的に低い価格とすることは DG 所有者との取引成立を遅らせることにつながり、これにより生じたマイクログリッド内の需給不均衡は、連系線を介した上位系統からの給電、もしくは連系線制御のために設置された電力貯蔵装置等の制御により補償されることになる。したがって取引成立に遅延が多く生じるほど、連系線や電力貯蔵装置の容量は多く必要となるため、これを設置する系統運用者にコスト増をもたらす要因となりうる。そこで、MA が取得されるまでの時間に対してペナルティを設定し、需給不均衡は需要家の行動に起因して生じたものと想定して、需要家に課すものとする。これにより、需要家には取引価格に近い初期価格で MA を送出することを目指す誘因が生まれる。本稿では、これらの行動モデルに学習を導入し、MA 取得タイミングや MA の初期価格を決定した。

なお、ペナルティとして徴収した料金は、電力会社が需給調整のために要する費用や、上記の通り連系線や電力貯蔵装置の増容量の費用等に充てられる。特に前述の通り、30 分同時同量の下で連系線潮流の変動が問題となる場合には、この費用負担の原資を確保することが重要となる。この関係を試算することは非常に複雑であるため、本稿では検討の対象とはしないが、このような使途で利用されることを勘案して、適正なペナルティ価格を定める必要がある。

4.3 学習モデル

需要家及び DG 所有者は学習理論に基づいて、各時間帯で個別に戦略を設定する。学習理論そのものは本稿で新規提案ではなく、本研究の目的に沿うような理論であれば、どのような学習理論を適用しても問題はないが、ここでは参考のために、本稿の数値計算で用いた強化学習の考え方を取り入れた方法を紹介する。まず戦略を離散化し、各戦略を選択する確率の初期値を与える。以後、選択確率と乱数を基にいずれかの戦略を採択し、同じ時間帯で過去に得られた利益の平均値と比較して、得られた利益が多ければ、その戦略に従う確率を高め、逆に少なければ、その戦略に従う確率を低める手続きを繰り返した。さらに、各時間の取引終了後、各 DG 所有者には当該時間に MA を利用してなされた取引のうちの最大取引価格が開示されるものとする。これにより各 DG 所有者は結果的に、同価格まで価格上昇を待つことがより自己の利益の増加をもたらしたはずと想定し、同価格の戦略に従う確率を高めることとした。以下に戦略確率の更新式を示す。

$$P_{a,b}^{i+1} = \frac{\{P_{a,b}^i + A(r - r_{ave}) + \alpha\} \times 100}{P_{a,b}^i + A(r - r_{ave}) + \sum_{j \neq b} P_{a,j}^i} \quad (1)$$

$P_{a,b}^i$: i 日目における DGa が戦略 b を採る確率, r : 得られた利益[yen], r_{ave} : 平均利益[yen], A : 利益に対する更新定数[1/yen], α : 最大取引価格に対する更新定数[1/yen]

4.4 再生可能エネルギーの不確実性への対応

国策として RE の大量導入が進展していることから、環境性の観点からは PV や WT といった再生可能エネルギーは優先的に使用すべきと考えられる。現在は全量買取制度により、RE の発電電力は高値で買い取られている。このように RE 出力が電力会社に売電される一方で、需要家がマイクログリッド内の安価な電力を選択して、電力会社から買電しない場合には、PV 出力は連系線を通して上位系統へと逆潮流することになる。ここで逆潮流が過大となる場合には、連系線容量にも注意する必要がある。

連系線および PCC の容量が不足する際には、マイクログリッド内の DG が出力を下げれば逆潮流が緩和される。ただしこれは、DG 所有者から買電していた需要家が電力会社からの買電に切り替えたことを意味し、当該の需要家および DG 所有者の立場からは、いずれも余剰の減少となる。このため同ケースで

は、実質的に逆潮流を生じさせている RE 所有者が出力を絞らざるを得ない。ただし DG 所有者と需要家が取引を行わずに RE 事業者が発電の機会を譲る場合、その出力が非常に高値で売電できることから、マイクログリッド全体としての余剰は確実に増加することが期待される。すなわち、RE 所有者が売電により得た利益の一部を DG 所有者および需要家に還元し、各プレイヤーが少なくとも損失を被らないような設計ができれば、無理なくマイクログリッド全体の余剰を増加できる。このとき、マイクログリッド外部も含めた電力システム全体を概観すれば、より RE の利用を促進したことになる。この概念は、以下の通りまとめることができる。

- ・ 全量買取制度により、RE 出力は上位系統に売電することができる。このとき、RE 出力は逆潮流となって連系線潮流の変化をもたらす。
- ・ 連系線潮流の逆潮流を減らすためには、RE 出力をマイクログリッド内に消費する必要がある。マイクログリッド内の他の DG と需要家との間の取引を停止して、当該需要家が RE 出力を（電力会社から）買電すれば、逆潮流を緩和できる。
- ・ 上記のように逆潮流を緩和できる場合に、RE 所有者が DG 所有者に利益を還元できるようなシステム構築を行う。

以上の概念は、RE 所有者が DG 所有者に対して“出力を下げた場合に支払いをする MA”を導入することで、前節で提案した方式に沿って実現できる。これをマイナスモバイルエージェント（-MA）と定義する。これを用いて、RE 所有者は全量買取による利益を原資として、可制御な DG に対して出力減少の取引を行う。一方、DG 所有者が-MA を取得することと、需要家の MA が RE 所有者の-MA を取得して消滅することは、いずれも連系線潮流の逆潮流抑制に寄与するものである。この場合の詳細は以下のように理解できる。

- ・ RE 所有者がその出力を電力会社に売電し、-MA を送出する。
- ・ 需要家の送出した MA が、-MA の提示価格を需要家が受け取ることに合意して消滅すると、当該需要家はマイクログリッド内の安価な DG からの供給を受けることができず、電力会社から通常の電気料金で購入することになる。
- ・ 結果的に買電先が DG から電力会社に切り替わったことにより買電費用は増加する。ただし-MA の取得により生じた利益増がこれを上回る場合は、需要家の利益が増加する。
- ・ 連系線潮流の観点からは、RE 所有者からの系統への売電と、需要家の系統からの買電がキャンセルするため、マイクログリッド内の RE 出力を需要家が消費することと等価になり、連系線の逆潮流の緩和に寄与する。なお-MA は MA と同様に、各 DG 所有者端に設置される PC 上に存在する。同一の PC 上において、常時 MA と-MA の共存の有無を確認し、共存があれば、

その両者間での決済の可能性を探る。また-MA と MA, および-MA と DG 所有者間の交渉のタイミングは乱数で決定する。すなわち MA と DG 所有者の-MA との交渉のタイミングは対等である。以上より, RE 所有者を含む場合の提案フローは以下のように整理できる。

＜提案手法 フロー2＞

(STEP 1) RE は $1\text{kW}\cdot\text{minute}$ 出力すると, -MA を情報通信ネットワーク内に 1 つ送出する。-MA には RE 所有者が任意に決定した価格情報が付随される。

(STEP 2) -MA はマイクログリッド内の情報通信ネットワークを動き回り, 取引相手を探す。-MA が取得されずに残る場合には, その価格を時間経過にしたがって上昇させる。

(STEP 3) DG 所有者は, 巡って来た-MA の価格を基に, 自らの DG 出力を売電するよりも-MA を取る方が, 利益が大きいと判断できる場合に-MA を取得する。同様に当該 DG 所有者の PC 上に MA が存在する場合は, MA も-MA の提示価格を基に, 利益が期待できる場合にはこれを取得する。

(STEP 4) -MA が DG 所有者に取得された時, -MA を送出した RE 所有者と取得した DG 所有者間で相対取引が成立する。この時, DG 所有者は $1\text{kW}\cdot\text{minute}$ 出力を減少させ, RE 所有者は-MA の取引価格を支払う。また-MA が MA に取得された場合, RE 所有者は提示価格を当該需要家に支払い, MA は消滅する。

第 5 章

数値計算例

5.1 数値計算設定

第 4 章における提案手法の有効性を、以下の設定に基づく数値計算により検討した。なお、ここでは RE として PV のみを考える。また以下では電力取引価格として[yen/kWh]を用いているが、個々のモバイルエージェントが取り扱う電力量は kW・minute であるため、その価格も[yen/kW・minute]に換算する必要がある。ただし[yen/kW・minute]での表記は直感的な理解に支障があると思われるため、ここでは[yen/kWh]のまま記載する。

- ・ 需要家は X [kW]の電力を消費すると、毎分 X 個の MA を生成する。
- ・ PV 所有者は Y [kW]の電力を出力すると、毎分 Y 個の-MA を生成する。
- ・ マイクログリッド内の需要と PV 出力の日間変動として、図 5.1 を用いる。
- ・ マイクログリッド内の DG 台数は 5 基として、便宜上 1-2-3-4-5-1 のようにリング状に配置し、1→5 の方向を時計回りと定義する。容量と各燃料コストは表 5.1 に示した。なお同表での燃料コストは定格出力時のものであり、部分負荷運転の際には図 5.2 に示すように発電効率の低下が生じる設定とした。ここで右側の軸には、発電効率の低下を考慮した燃料コストを、DG1 の場合について合わせて示している。
- ・ 学習期間は 1 年間とする。
- ・ DG 所有者の戦略として、MA 取得のタイミングを“各 DG の燃料費より+1, +2, +3, ～, +10 [yen/kWh]高い場合”，と離散的に戦略 1～10 の 10 段階とした。なお-MA に関しては，“自らの出力を売電するよりも、利益が+2, +4, +6, ～, 20 [yen/kWh] 高い場合”，と離散的に戦略 1～10 の 10 段階とした。
- ・ 需要家の戦略として、MA を送出する際の初期価格を 8, 9, 10, ～, 17 [yen/kWh] と離散的に戦略 1～10 の 10 段階とした。
- ・ MA は最初に訪れる DG をランダムに決定し、その後 1 分ごとに時計回りに DG を順に訪れる。そして、その取引価格を 1 巡で 1 [yen/kWh] 上昇させる。
- ・ ペナルティは、1 巡（すなわち、本モデルの場合は 5 分間経過）すると 1 [yen/kWh] 上昇するものとした。
- ・ 上位系統から連系線を介して買電する際の価格を、一律 17 [yen/kWh] とする。

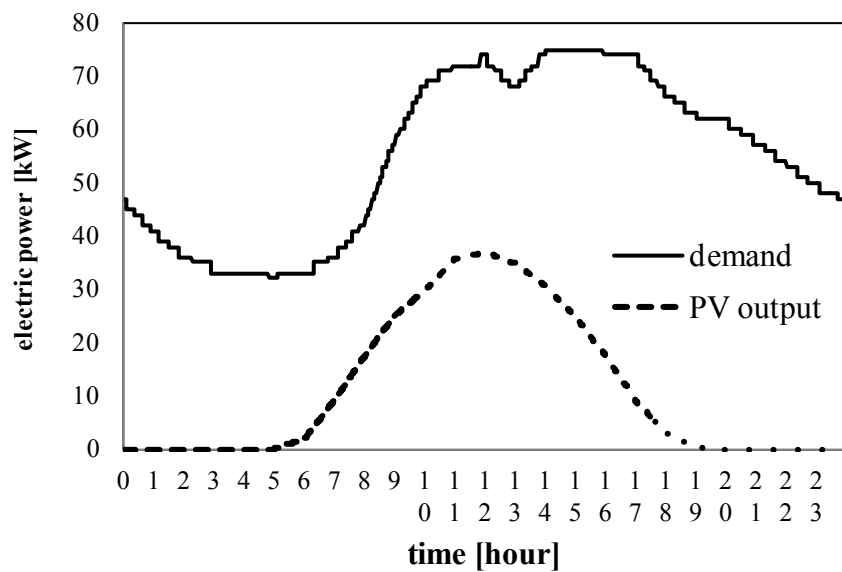


図 5.1 負荷曲線と PV 出力

表 5.1 各 DG の容量と発電コスト

DG	1	2	3	4	5
Capacity [kW]	25	12	18	10	15
Generating cost [yen/kWh]	9	7	10	8	7

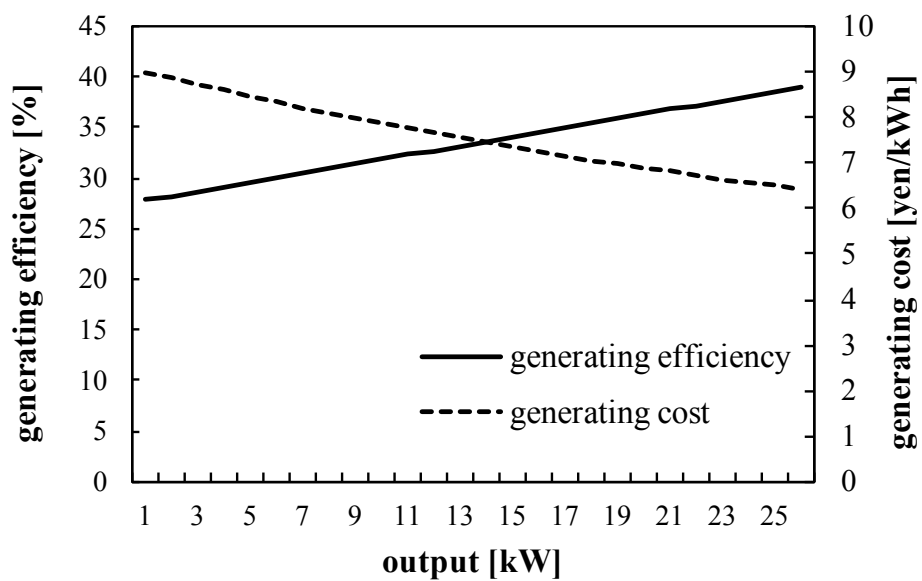


図 5.2 DG1 における発電効率と燃料費

これにより同価格がプライスカップとして働くことになる。

- PV 所有者の戦略として、-MA を送出する際の初期価格を 8, 10, 12, ～, 26 [yen/kWh] と離散的に戦略 1～10 の 10 段階とした。
- -MA は MA と同様に、最初に訪れる DG をランダムに決定し、その後 1 分ごとに時計回りに DG を順に訪れる。そして、その取引価格は 1 巡で 1 [yen/kWh] 上昇するものとした。
- PV の出力は系統運用者が一律 34 [yen/kWh] で全量買い取りをすることとする。

5.2 数値計算結果

以降に本提案手法を適用した結果を示す。本提案手法の性能は学習の性能にも依存しているが、強化学習による挙動は試行錯誤的な行動も含むため、時として理屈に合わない行動を取るプレイヤーも存在する。これにより理解が困難になることを避けるために、ここでの数値計算結果は、1 年間の学習期間の経過後に 30 日間の数値計算を行い、同期間中で得られた DG 出力や利益などの結果を平均した値で示している。すなわち、学習の収束が進んだ後の平均的な挙動を観測していることを意味する。なお、-MA の取り扱いは本提案手法の重要事項の一つであるが、この点の考察を特に深めるために、-MA を DG 所有者のみが取得する場合と、-MA を MA も取得できる場合と、二つのケースに分けて数値計算結果を示す。

5.2.1 DG 所有者のみが RE 所有者と交渉できる場合 (case 1)

まず、各 DG および PV 出力の日間変動を図 5.3 に、連系線潮流量の日間変動を図 5.4 に示した。ここで連系線潮流に関しては、30 分同時同量での評価が求められると想定して、各時間帯の平均値を示している。同図より、負荷変動に対して供給力が概ね追従できていること、また PV 出力の大きい時間帯の連系線潮流が他の時間帯に比較して大きいことがわかる。さらに-MA の効果を把握するために、-MA の取得による各 DG の出力減少量を図 5.5 に示した。同図より、PV の出力分に対して適切に他の可制御な DG が出力を下げており、-MA が機能していることが確認できる。特に DG3 や DG1 などの燃料コストが高い DG の方が、売電量を減少させたときの燃料コストの負担減が大きく利益が得られやすいため、より積極的に-MA を取得している様子がわかる。次に均衡解の様子を確認するために、オフピーク帯 (7:00~8:00) とピーク帯 (14:00~15:00) における各 DG の取引の様子を図 5.6 に示した。ここでは各 DG の供給曲線のイメージが得られやすいように、各 DG の実施した取引を、取引価格順に並べて示している。オフピーク帯では需要に対して供給量が十分確保されているため、各 DG が競争的に MA を奪い合うことにより、電力会社からの買電価格より低い価格で取引がなされている。この事例では、すべての電源において 12 [yen/kWh] が均衡解となっていることが分かる。一方、ピーク帯では需給ひっ迫によって DG 群が競合的に価格を引き上げるため、プライスカップの 17 [yen/kWh] 付近で取引がなされている。この傾向は PV 出力が小さい時間帯でも同様である。具体的に、雨天等の影響により PV 出力が無い場合を想定して均衡解を算出し、各 DG 所有者のオフピーク帯およびピーク帯での戦略の様子を図 5.7 に示す。最も大きな選択確率を有する戦略は、PV 出力時と同様の傾向を

示している。

次に各時間帯における DG 所有者全体と需要家全体の利益を図 5.8 に示した。ここで、DG 所有者の利益とは、需要家への売電収入と、PV 所有者からの出力調整依頼の収入の合計である。そして、需要家の利益は全需要量を一律の上位系統料金で購入した場合の支出に対する、提案手法による買電支出の差分とする。つまり需要家の利益は、需要家がこのマイクログリッドに参加することによるメリットとなる。同図より、オフピーク帯では各 DG が価格競争することによって需要家に利益が出ているのに対し、ピーク帯では需給ひっ迫による価格引き上げにより DG 所有者のみに利益が出ていることが確認できる。さらにピーク帯では出力調整の収入も加わり、DG 所有者の利益が非常に高くなっている。

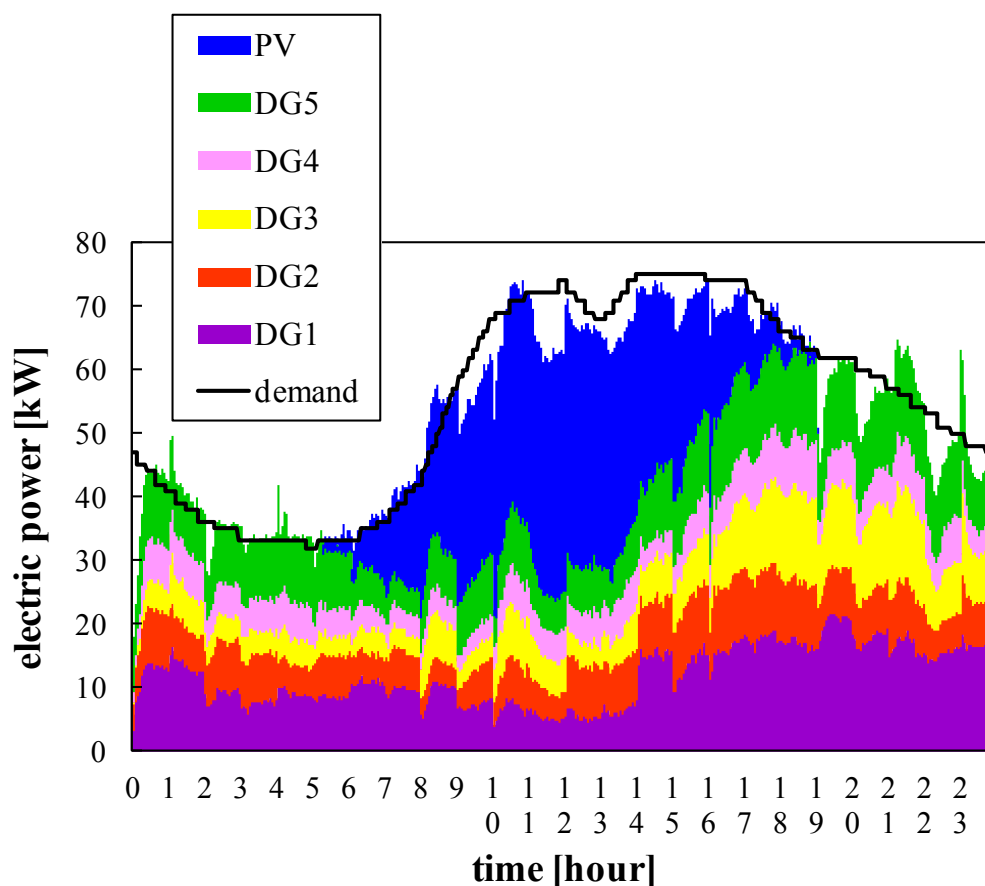


図 5.3 需給曲線

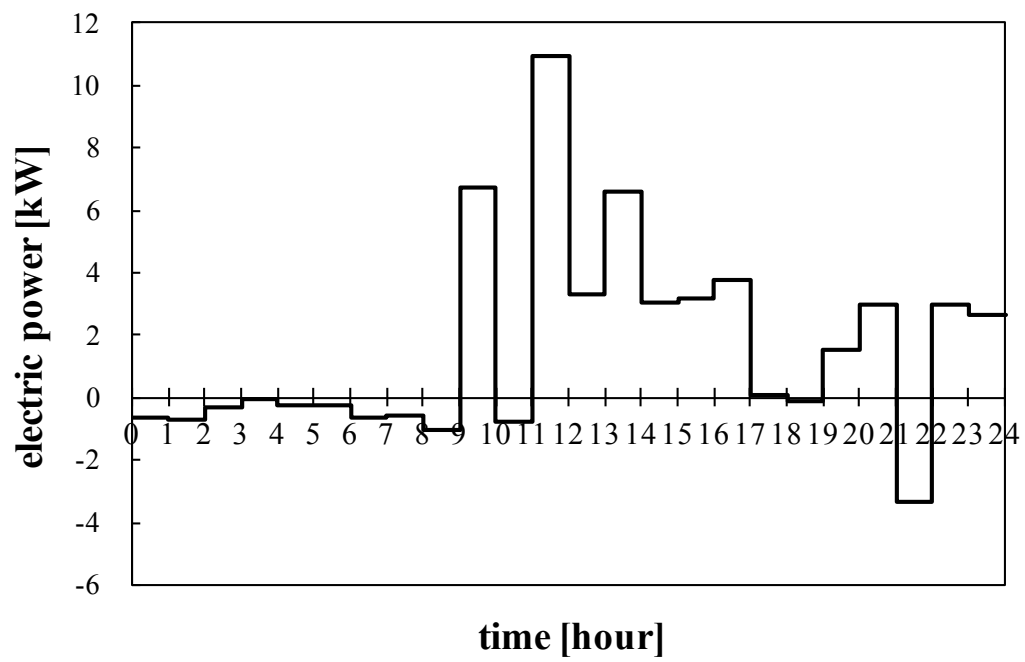


図 5.4 連系線潮流

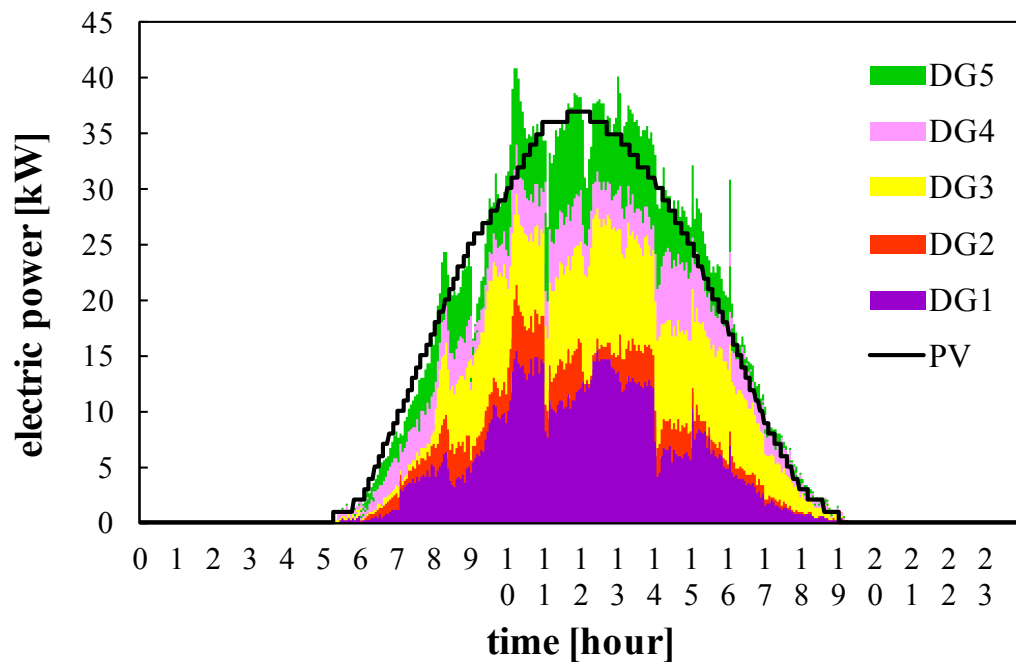
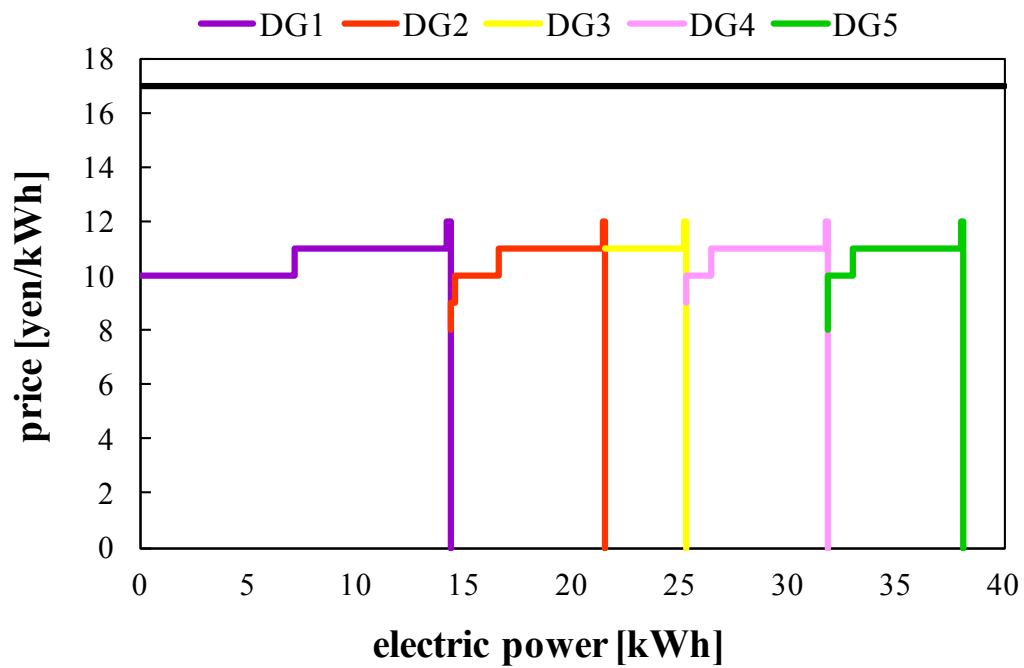
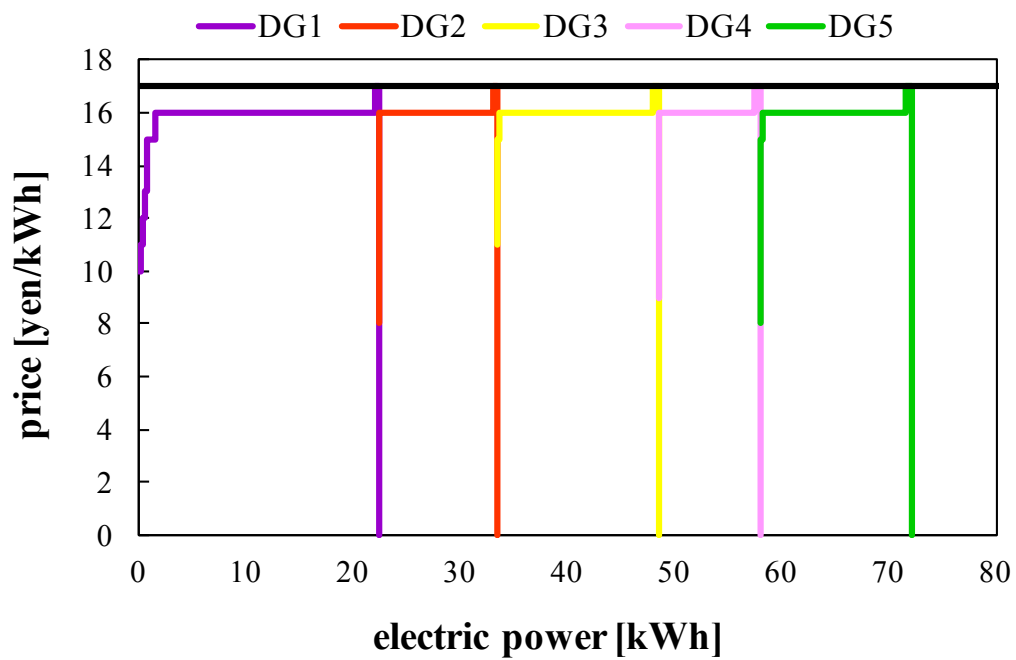


図 5.5 各 DG の出力減少量

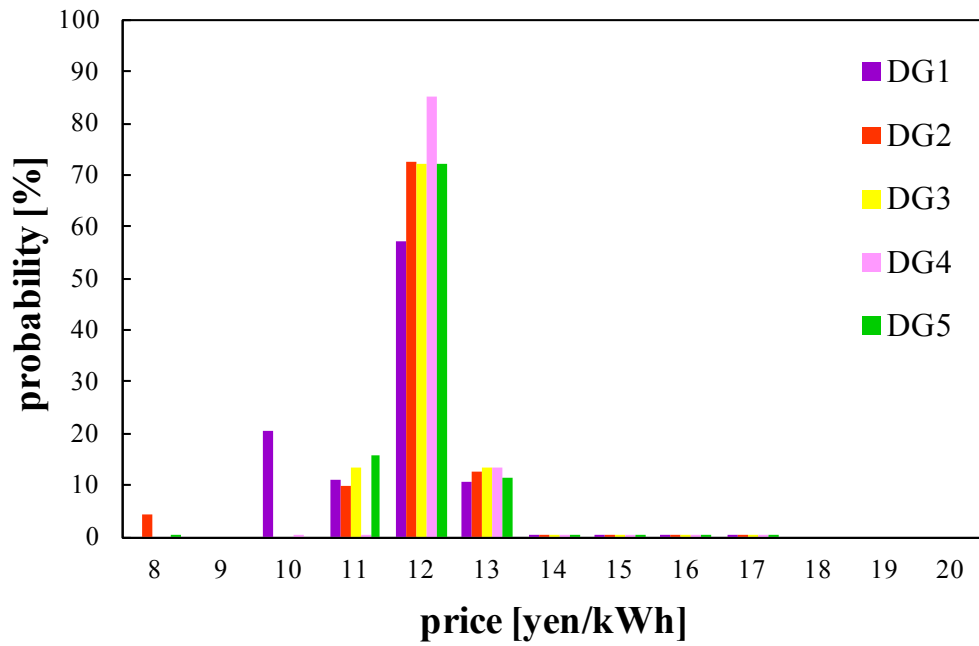


(a) Off peak time (7:00~8:00)

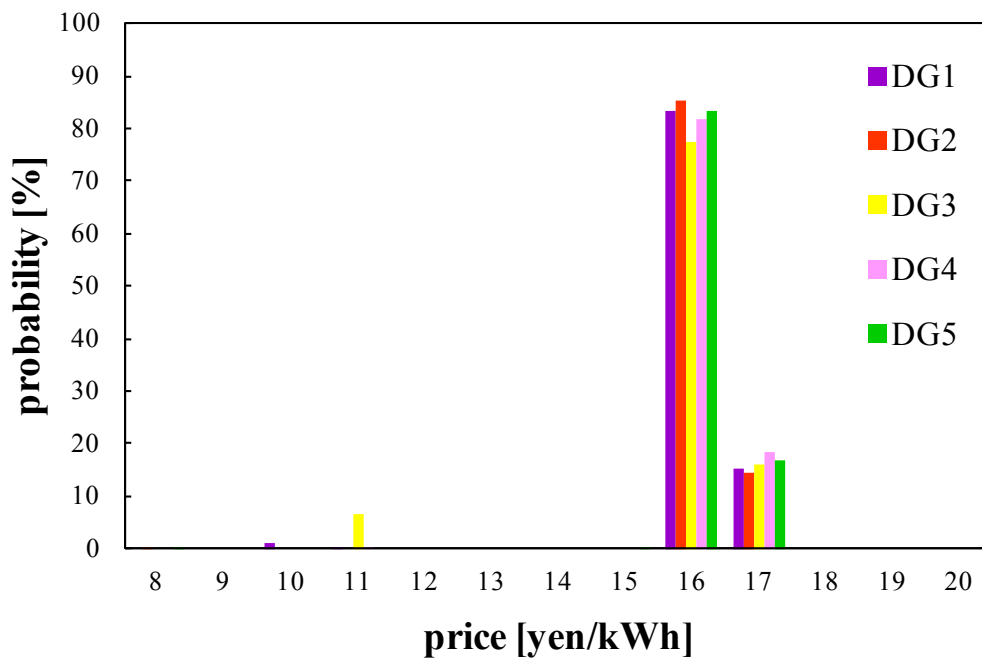


(b) Peak time (14:00~15:00)

図 5.6 各 DG における価格毎の取引量



(a) Off peak time (7:00~8:00)



(b) Peak time (14:00~15:00)

図 5.7 各 DG 所有者の戦略

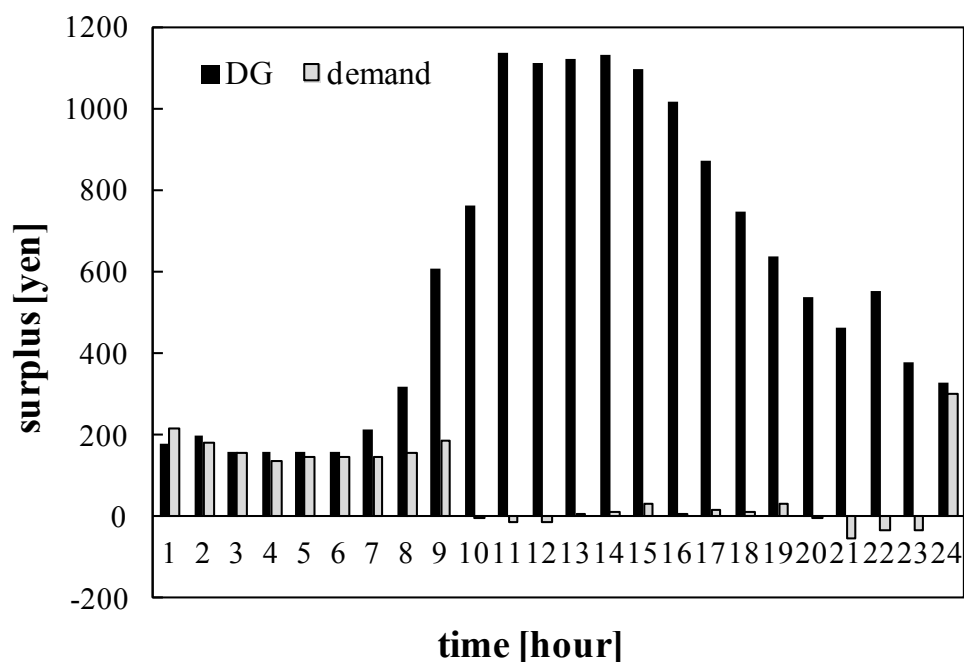


図 5.8 時間毎の利益

5.2.2 需要家も RE 所有者と交渉できる場合 (case 2)

前節の図 5.8 では、DG 所有者の利益は PV 出力の大きい時間帯で著しく高くなっている。これは、MA と -MA 両方の取得によって利益を得ているためであり、DG 所有者に非常に有利な状況となっている。そこで、需要家も RE 所有者と交渉できる場合を想定し、各 DG および PV 出力の日間変動を図 5.9 に、-MA の取得による各 DG の出力減少量を図 5.10 に、各時間帯における DG 所有者全体と需要家全体の利益を図 5.11 に示した。図 5.9 より、前節の数値計算例と同様に負荷変動に対して概ね供給力が追従できているのに対し、各 DG の出力減少量は前節に比べて格段に少なくなっている。これは、MA が各 DG より優先的に -MA を取得したために、各 DG の -MA の取得機会が著しく減少した結果である。これにより、前節では PV 出力の大きな時間帯に得られていた DG 所有者の利益の一部が、需要家の利益へと流れたことが図 5.11 から確認できる。

最後に case 1 と case 2 における日間を通じた各プレイヤーの利益の比較を図 5.12 に示す。図中の黒い箇所は、PV 所有者からの -MA 取得により生じた利益を示している。case 1 では PV 所有者からの -MA を全て DG 所有者が取得するため、DG 所有者は -MA の価格上昇を十分に待ったうえでこれを取得し、大きな利益をあげている様子がわかる。一方で case 2 では、需要家も -MA を取得で

きるため、-MA の取得が競争的になり、平均的な取引価格が低下していることが、PV 所有者の利益が増加していることから推察できる。DG 所有者は-MA 取得による利益が減少するだけではなく、需要家が-MA を取得して電力会社から買電することにより、DG 所有者の需要家への売電収入も減少するため、case 1 に比較すると利益の減少が大きい。ただし、DG 所有者、PV 所有者、需要家の 3 者のバランスは、case 2 の方が均一的であると言える。適正なバランスの在り方に関しては、マイクログリッドのシステム構成上のポリシーが強く関係してくるため本稿では言及せず、各システムの運用者に委ねられるべきことと考えられる。いずれにしても、設備投資に要した費用回収などの観点から指針を定め、-MA の取引に関するルールなどを確定させることが重要である。

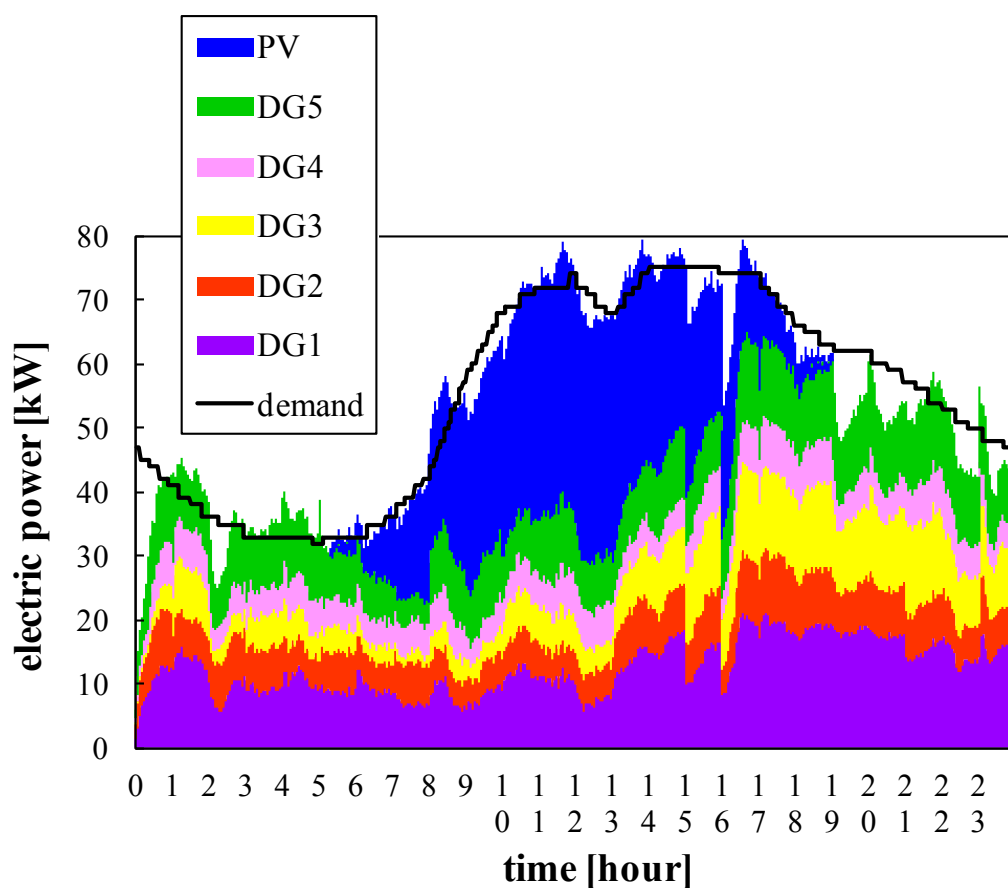


図 5.9 需給曲線

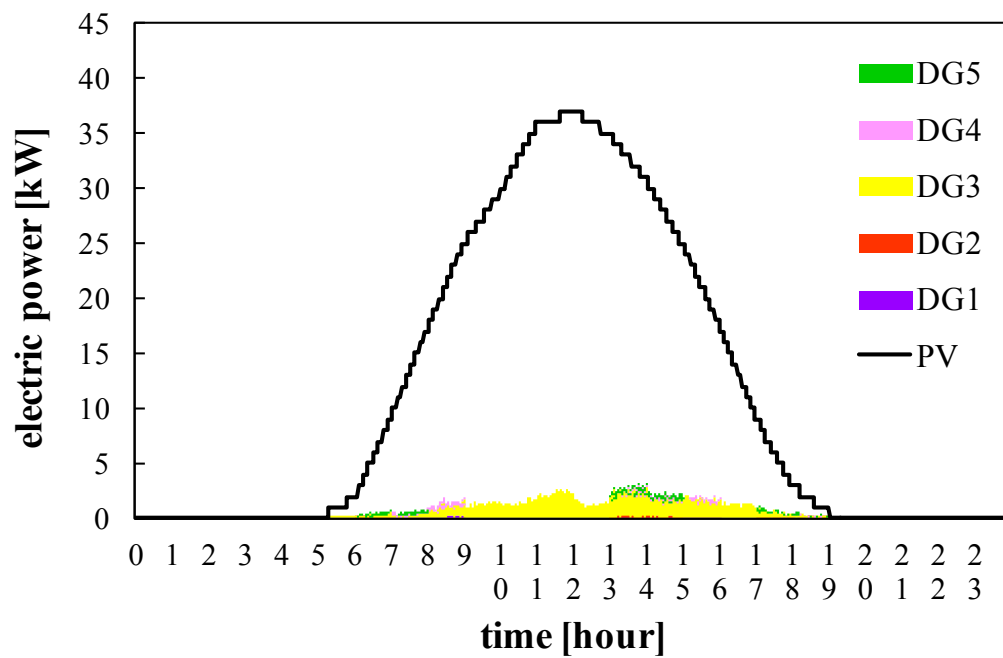


図 5.10 各 DG の出力減少量

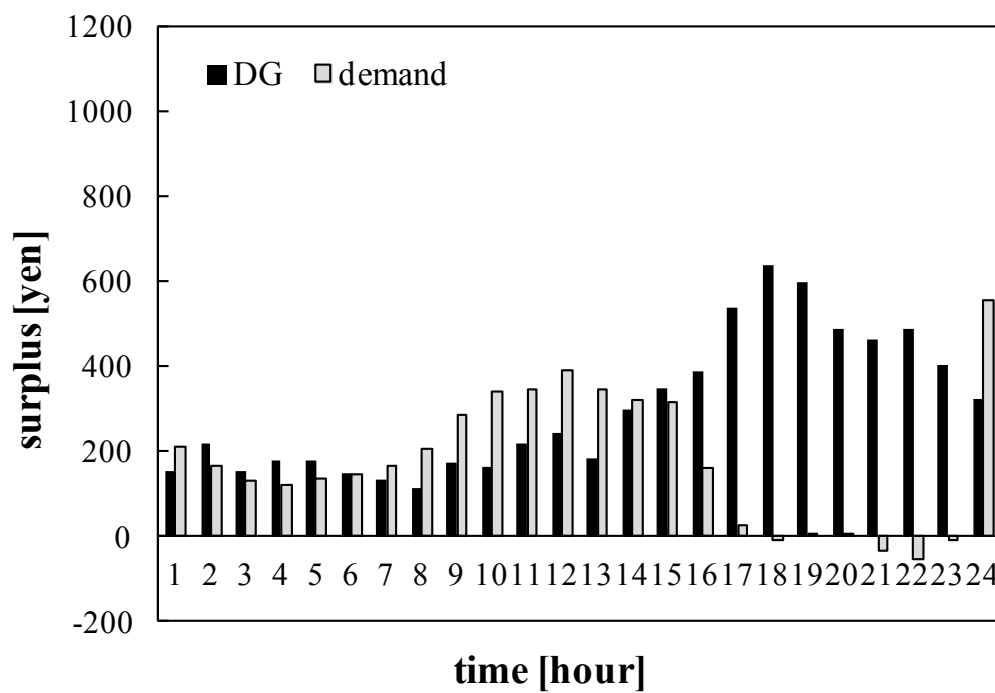
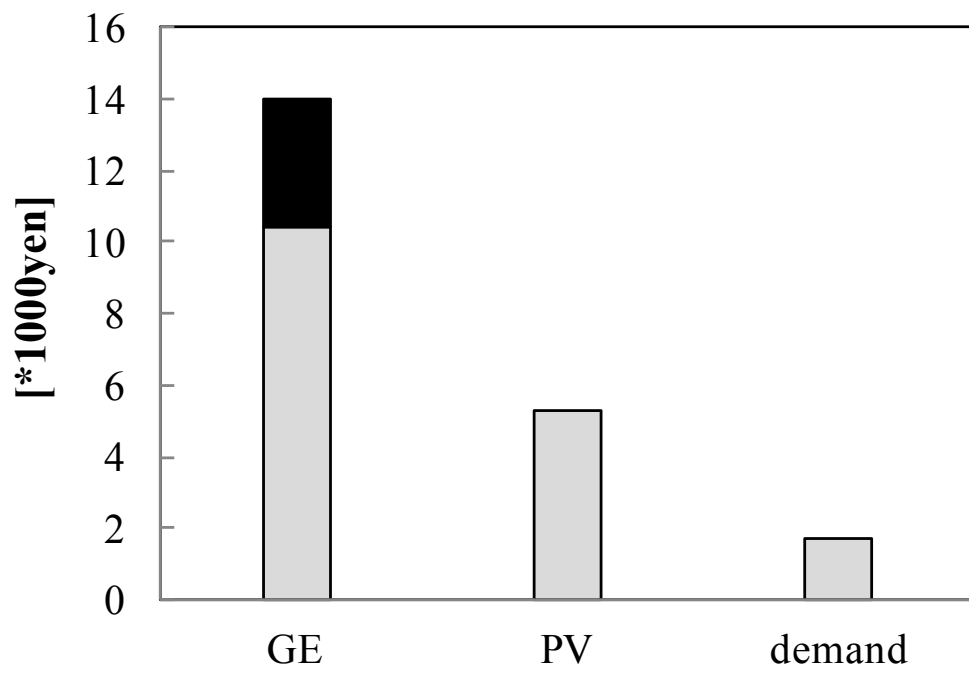
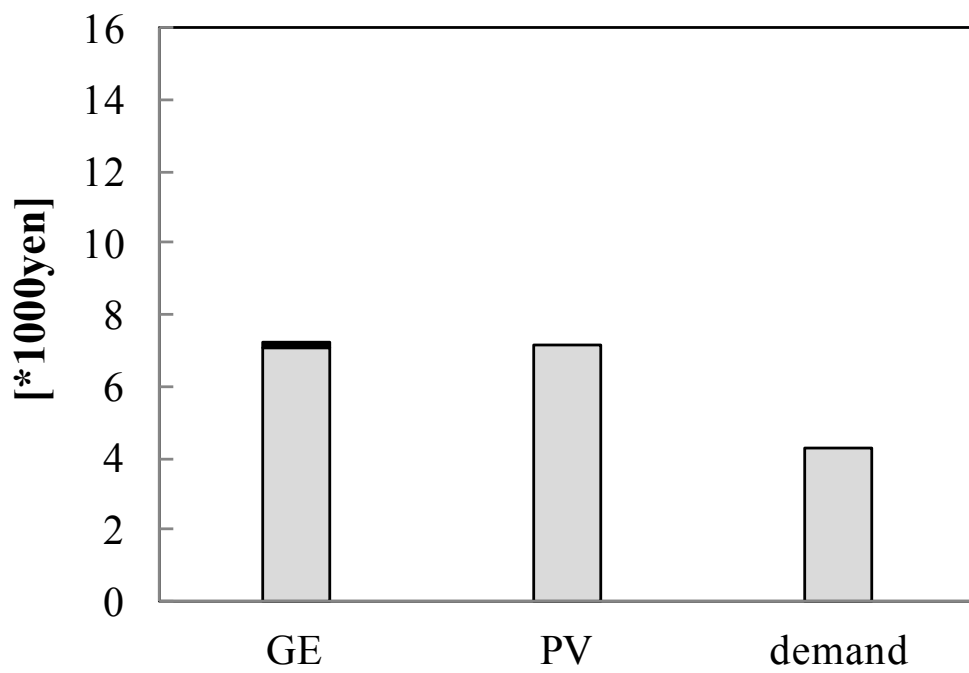


図 5.11 時間毎の利益



(a) case 1



(b) case 2

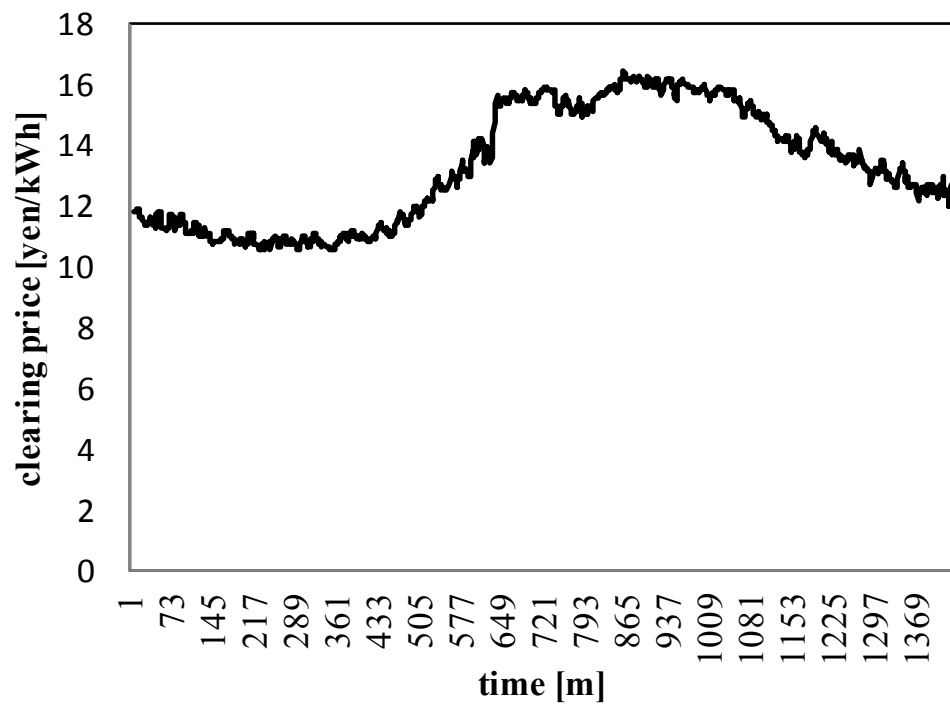
図 5.12 日間を通じた各プレイヤーの利益

5.2.3 市場取引による中央集中的運用方式との比較

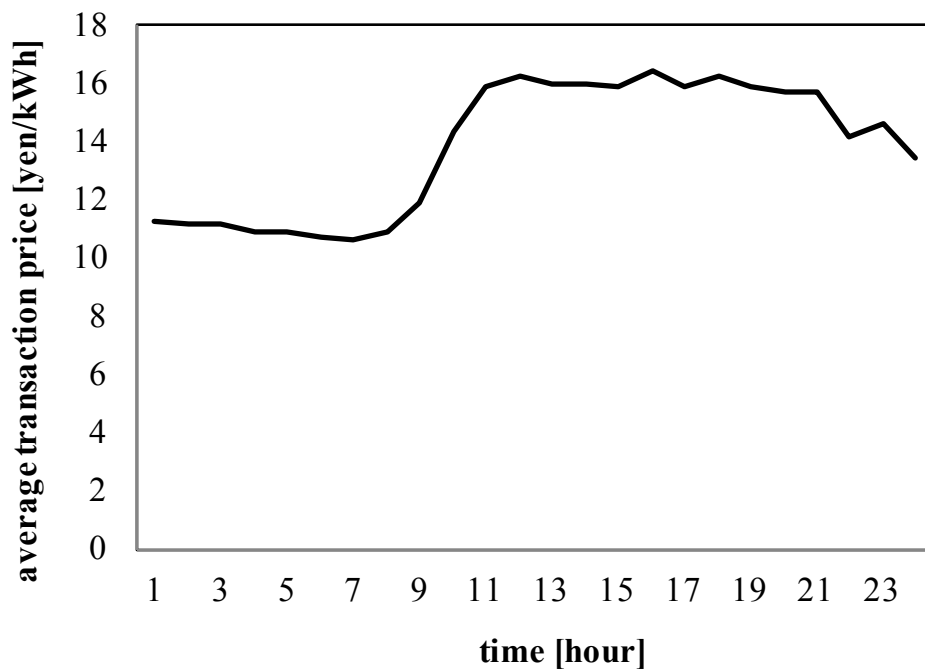
第 3 章にて述べた市場取引を適用した中央集中的な運用との比較を行った。まず、日間を通じた取引価格の推移を図 5.13 に示した。ここで、取引価格の推移とは市場取引方式においては需給均衡価格の推移のことである。一方、MA 取引方式では各プレイヤーの行動が時間毎に設定されることから、当該時間に為された取引の平均価格の推移とした。市場取引方式では市場取引の清算が毎分行われることに起因して細かい変動が出るが、今回の検討ではその影響は特に言及しないため、ならして表示している。

図 5.13(a)より、初めにオフピーク時間帯 (time=0~490) では 12 [yen/kWh] 付近で推移している。その後ピーク時間帯 (time=720~960) に向けて価格が上昇し、ピーク時間帯では価格の上限に設定した 17 [yen/kWh] に近い 16 [yen/kWh] 付近で推移し、その後はなだらかに下降していく。この推移の傾向は、図 5.3 の負荷曲線の推移と酷似している。したがって、供給力に余裕のあるオフピーク時には均衡価格が下がり、逆に需給がひっ迫するピーク時には均衡価格が上がる傾向となる。図 5.13(b)より、MA 取引方式でも同様の傾向が見られ、市場取引方式と非常に似通った推移となっている。このことから、分散的な MA 取引方式が中央集中的な市場取引方式と同等の動きをしていると考えられる。つまり、MA 取引方式が市場取引による経済合理的な負荷配分が達成できていると考えられる。

次に、需給曲線を図 5.14 に示した。市場取引方式では需要側で入札を行わないため、需給均衡価格の決定プロセスにおいて需要の過不足が発生しないため、需給曲線は一致している。一方、MA 取引方式では概ね需給バランスが満たされているが、部分的に不一致の傾向も見て取れる。MA 取引方式では、MA の価格が時間とともに上昇していき、上位系統の料金である 17 [yen/kWh] に達すると上位系統から購入する仕組みを組み込んでいる。需要がピーク付近では、上位系統の料金付近で取引を行う傾向にあるため、17 [yen/kWh] に達してしまい、上位系統に発電機会を奪われたため、需給バランスが少し乱れている。ただし、30 分同時同量の考え方もあり、必ず一致させる必要性は薄い。さらに、複数のマイクログリッドが存在する状況であるならば、ひとつひとつで需給バランスが乱れても、全体ではならされる、“ならし効果”も期待でき、さらに影響は小さくなると考えられる。

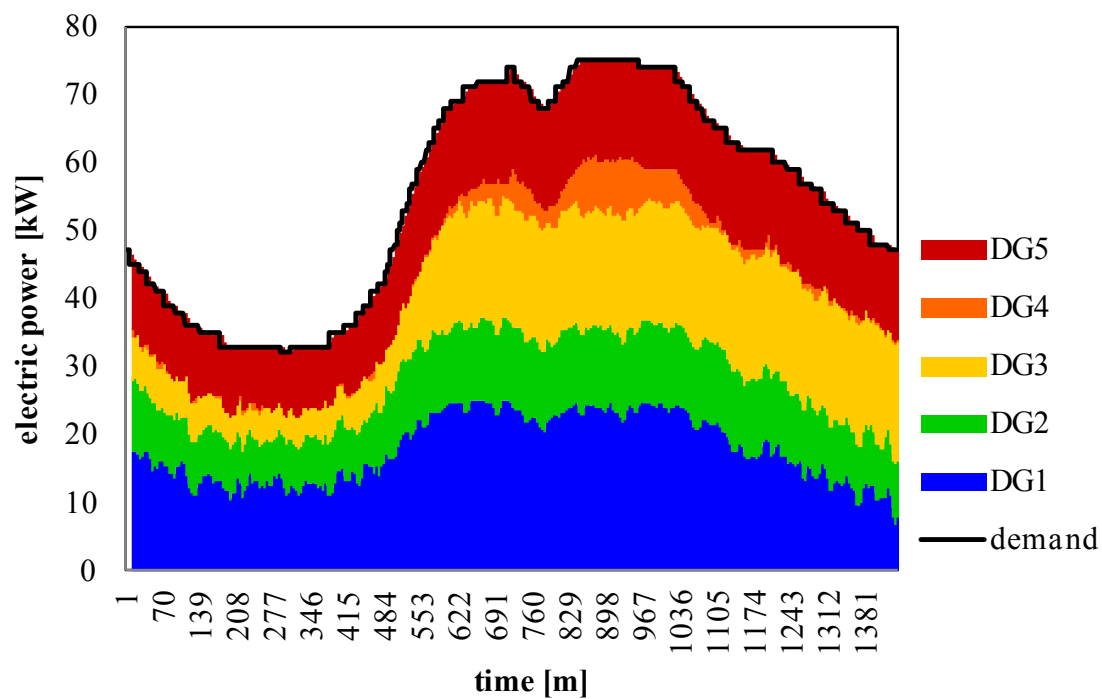


(a) 市場取引方式

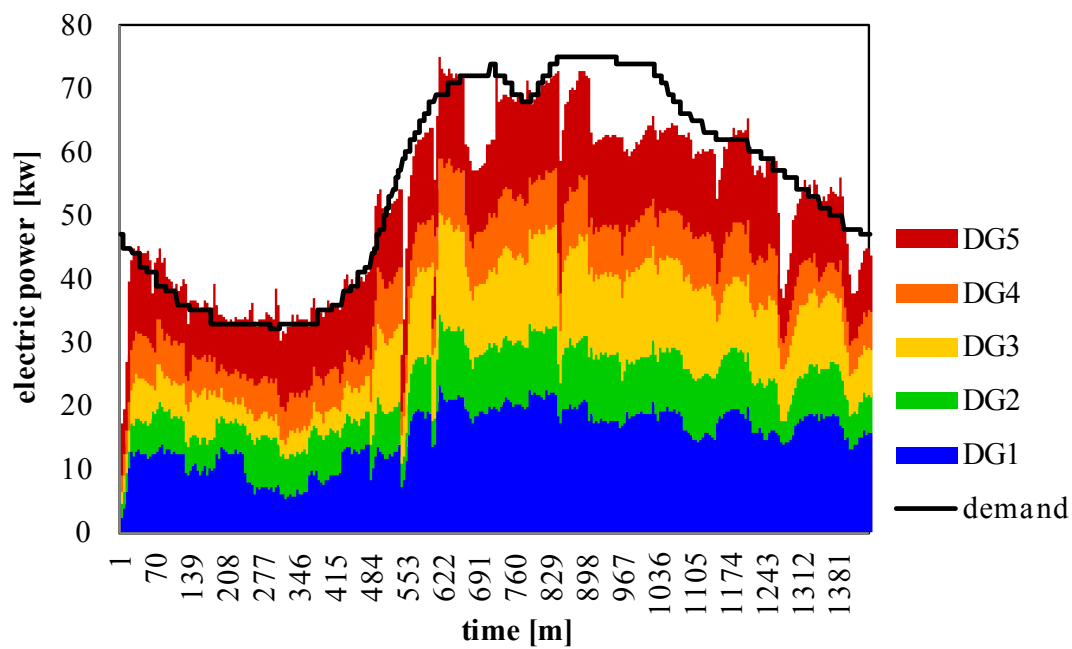


(b) MA 取引方式

図 5.13 取引価格の推移

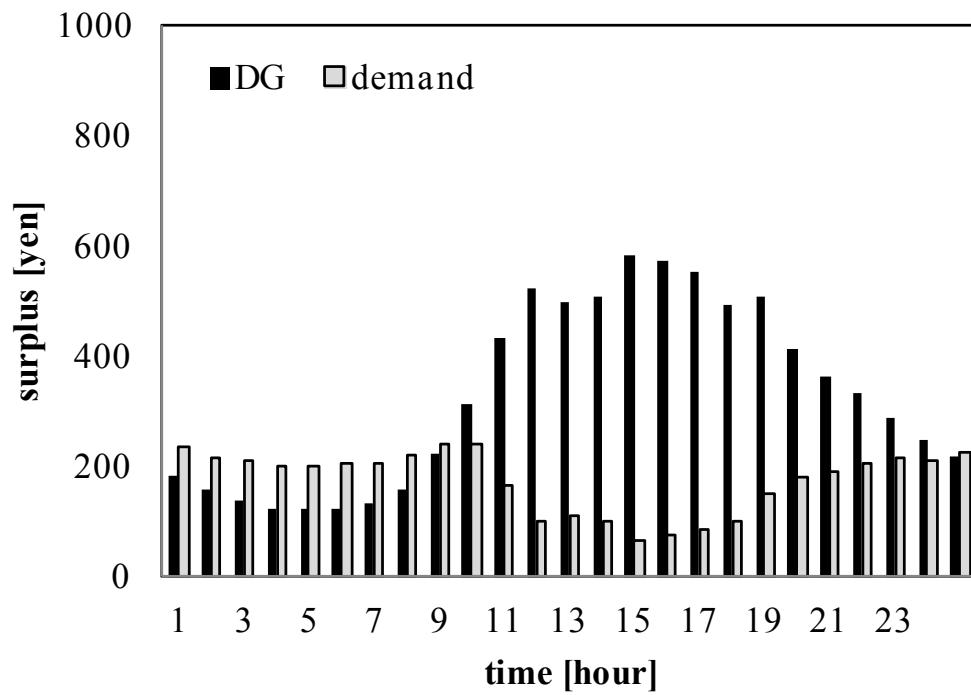


(a) 市場取引方式

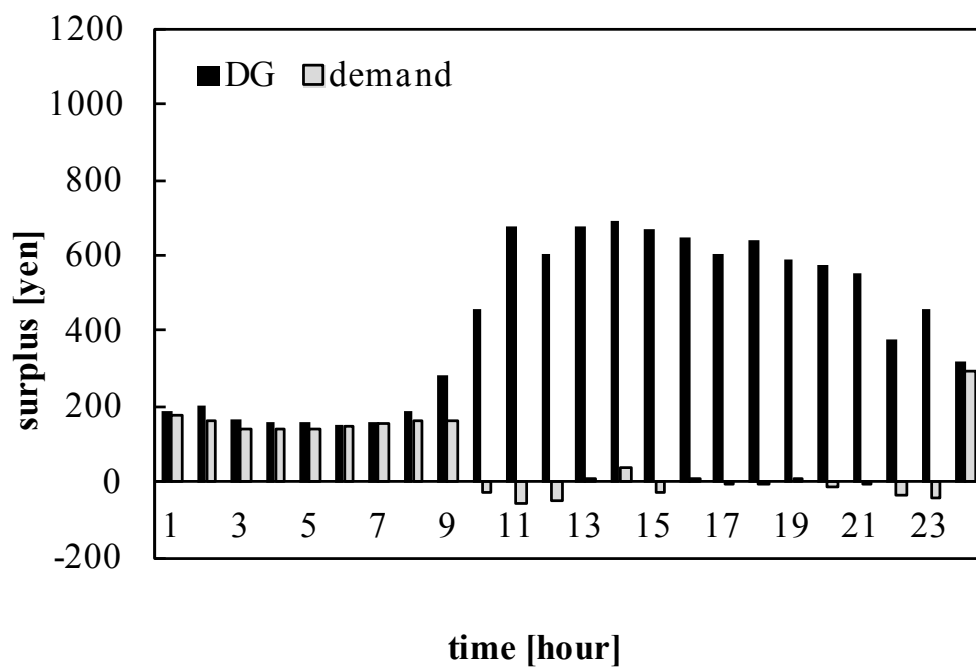


(b) MA 取引方式

図 5.14 需給曲線



(a) 市場取引方式



(b) MA 取引方式

図 5.15 利益の推移

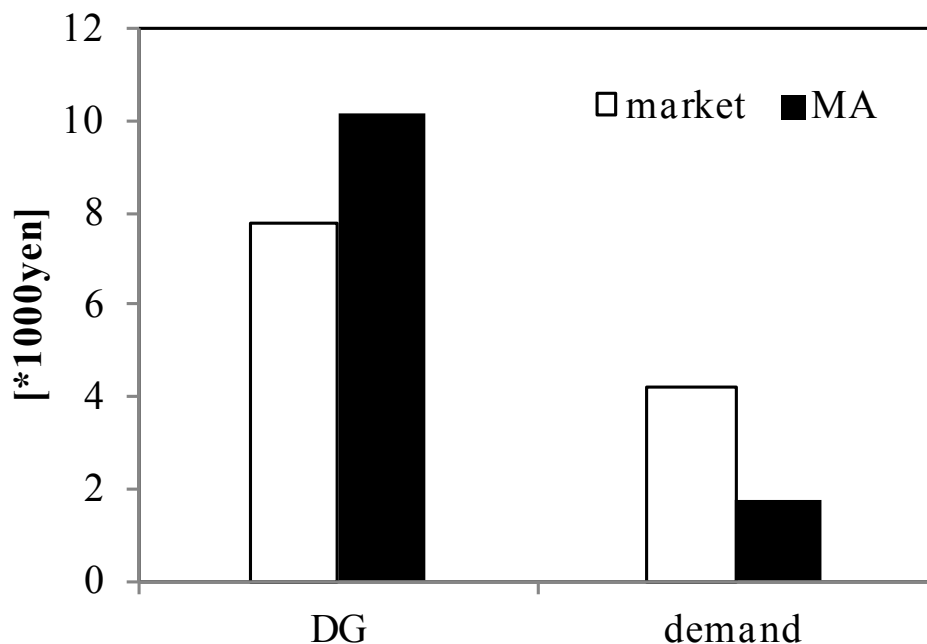


図 5.16 DG 所有者と需要家全体の利益

続いて、需要家全体と DG 所有者全体の 1 時間毎の利益を図 5.15 に示した。需要家の利益は需要家への売電収入、需要家の利益は全需要量を一律の上位系統料金で購入した際と両方式での支出との差額とする。つまり、需要家の利益はこのマイクログリッドに参加するメリットになる。両方式ともにピーク時間帯では DG 上位系統料金付近まで価格をつりあげるので、需要家側の利益が少なくなり、DG が非常に高い利益を上げている。MA 取引方式と市場取引方式では、市場取引方式の方が需要家の利益がより出ている。これは、MA 取引方式では、取引遅延に対して需要家にペナルティが課される事や、上位系統料金に到達することによる上位系統からの電力購入が少なからず関係していると考えられる。このことは、図 5.16 に示した DG 所有者全体と需要家全体の 1 日の合計の利益のグラフからも読み取れる。

5.2.4 デマンドレスポンス

図 5.17 にデマンドレスポンスによって変化した負荷曲線、図 5.18 に需要の変化率を示した。まず、深夜から朝の時間帯 (time=0~420) においては需要に対して十分供給力があるため、売電の価格競争が発生する。これによって、売電価格が低く設定されることで需要が増加している。次に、昼の時間帯 (time=600~960) においては需給がひっ迫することにより価格の吊り上げが発生する。したがって、価格が高めに設定され需要は減少している。以上より、デマンドレ

スポンズの動きが確認でき, MA を用いた本制御方式においてデマンドレスポンスが適応できると言える。

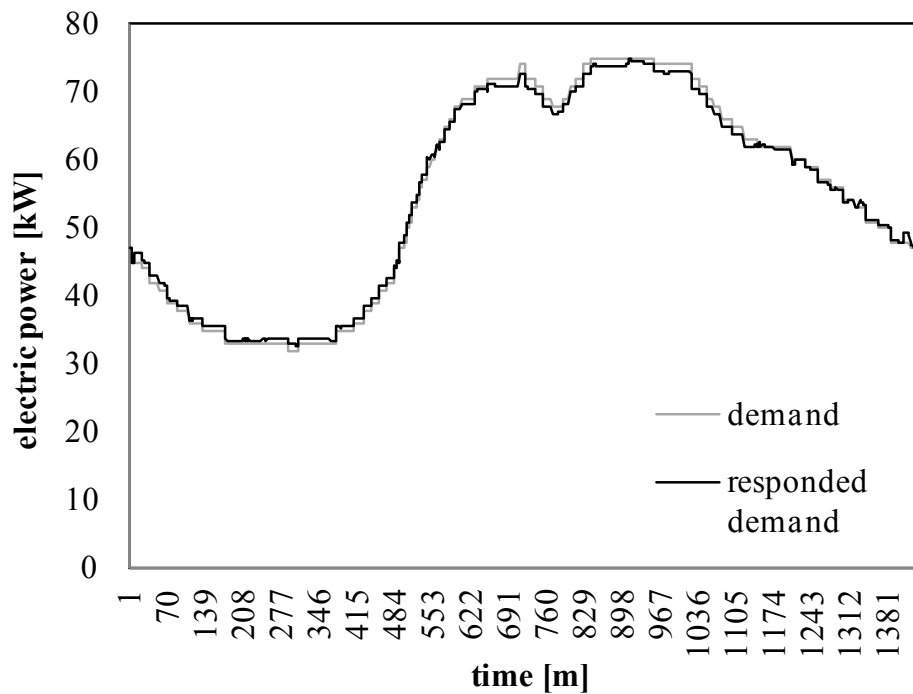


図 5.17 負荷曲線の変化

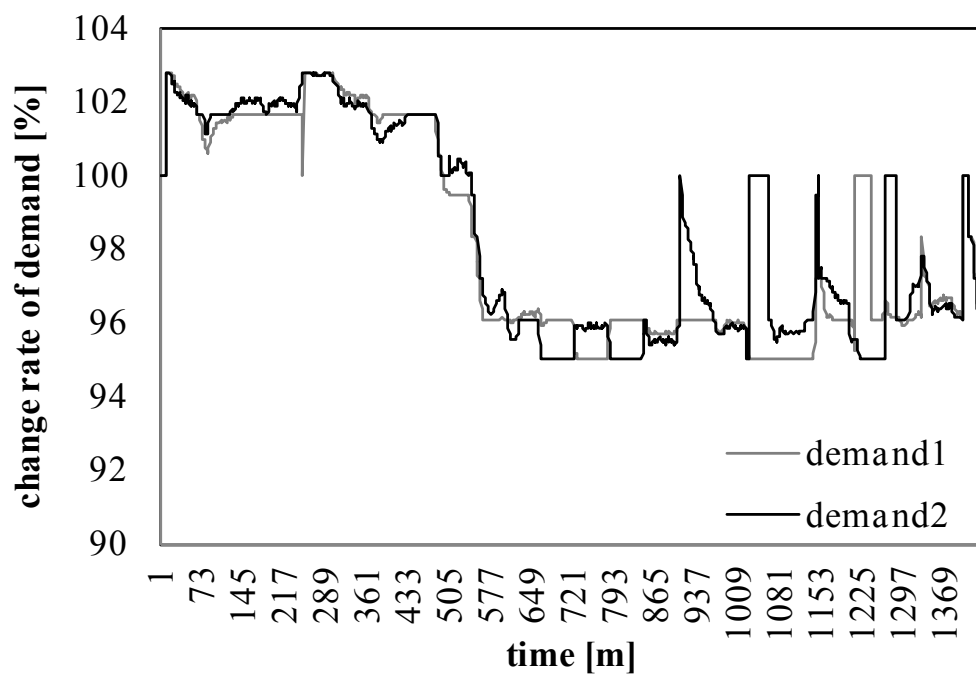


図 5.18 需要の変化率

第 6 章

結論

本稿では、MA によるマイクログリッドにおける需給制御を提案し、シミュレーションを通してその効果を示した。各々の DG 所有者が経済性を重視した行動を目指した結果、売電価格の均衡解は、ピーク時間帯においてはプライスキップに準じた 16 [yen/kWh]、一方オフピーク時間帯においてはピーク時間帯より低い 12 [yen/kWh] と需給の逼迫具合によって違いを確認できた。

さらに、再生可能エネルギーが導入した場合を考慮し、不可制御な PV の出力に対して可制御な電源に出力を下げてもらう依頼をするための MA を導入した。その結果、PV 所有者は全量買取で得た利益の一部を用いて自身の出力を可制御な電源に分配することができた。需要家と DG 所有者の利益においては、時間帯によって傾向が異なるが、日間を通しては双方に利益が出る結果となった。そして、DG 所有者だけでなく需要家も PV 所有者と電力取引をすることによって、PV が出力している時間帯において差が顕著だった利益が需要家へと分配された。このような関係の中、適正な利益配分の決定方法は、最終的には各システムの運用者に委ねられるべきものである。

市場取引を取り入れた中央集中的な運用方式との比較により、提案している MA による分散型需給運用方式は概ね市場取引による中央集中型需給運用方式と取引価格の推移において同等の動きを確認できた。これにより、経済合理的である市場取引による運用と同等の動きを分散的な仕組みで達成できる可能性が示唆できた。

今後の課題として、発電機の起動停止を含むユニットコミットメントの考慮や、発電機のより詳細なモデルによる制御の評価の検討、また本システムに適した学習理論の検討が必要であると考えている。

謝辞

研究を進めるにあたって、ご多忙の中時間を割いて多大なるご指導ならびにご助言をいただいた辻隆男准教授ならびに大山力教授に深い感謝の意を表します。

なお、大山研究室技官の佐藤敏之氏をはじめ辻研究室・大山研究室内の皆様には、数々の御指導および励ましをいただき、大変お世話になりました。御礼申し上げます。

最後に、大学生活を終えるにあたり、大学院修了まで勉強する機会を与えてくださった両親にも心より感謝いたします。

参考文献

- [1] A. Yokoyama : “Trends and Forecasts for Novel Electric Network System – General Remarks”, *IEEJ Journal*, Vol.125, No.3 p.145-148 (2005-3) (in Japanese)
横山明彦:「新たな電力供給システムの動向と将来展望—1 総論」, 電学誌, Vol.125, No.3 p.145-148 (2005-3)
- [2] Hiroaki Sugihara, Akihiro Ogawa, Manabu Kuramoto, Fumio Ishikawa, Hideo Yata, Toru Fukushima : “Conceptual Study of Power System Stabilization and Supply-Demand Balancing for Expansion of the Introduction of Wind Power Generation in Poland”, *IEEJ Trans. PE*, Vol.133, No.4 pp.350-357 (2012) (in Japanese)
杉原弘章・小川明宏・倉本学・石川文雄・矢田秀夫・福島透:「ポーランドにおける風力発電導入拡大のための安定化・需給制御の基礎的検討」, 電学論 B, Vol.133, No.4 pp.350-357 (2012)
- [3] Masahiro Sekoguchi, Tetsuo Yamada, Masanori Kaminaga, Syuhei Yamano, Juichiro Atsumi, Chihiro Fukui, : “The Evaluation of ELD Coordinating Self Healing Dispersed Power Supply”, *IEEJ Trans. PE*, Vol.133, No.6 pp.523-530 (2013) (in Japanese)
世古口雅宏・山田哲夫・神永正教・山野修平・渥美寿一郎・福井千尋:「自律分散電源協調型 ELD 制御の評価」, 電学論 B, Vol.133, No.6 pp.523-530 (2013)
- [4] “Japan’s Pivot to Resilience How Two Microgrids Fared After the 2011 Earthquake”, *IEEJ PE magazine*, (2015)
- [5] Shunsuke Kawachi, Jumpei Baba, Kei Furukawa, Eisuke Shimoda, : “Verification Test of Short Term Power Fluctuation Compensation in Microgrid by Use of Air-Conditioning System for Commercial Building”, *IEEJ Trans. PE*, Vol.133, No.4 pp.358-365 (2012) (in Japanese)
河内駿介・馬場旬平・古川慧・下田英介:「業務用空調機消費電力制御によ

る短周期電力変動補償のマイクログリッドにおける実証試験」, 電学論 B, Vol.133, No.4 pp.358-365 (2012)

- [6] Shunsuke Kawachi, Jumpei Baba, Hiroyuki Kihara, Takayuki Sugimoto : “Proposal of Control Parameter Designing Method and Actual Machine Test of Short Term Power Fluctuation Compensation System by use of Heat Pump Air-Conditioning System as Controllable Load”, *IEEJ Trans. PE*, Vol.135, No.1 pp.42-49 (2014) (in Japanese)

河内駿介・馬場旬平・木原寛之・杉本貴之:「空調機器を可制御負荷として含むマイクログリッドにおける電力変動補償制御の制御パラメータ決定手法提案と実証試験」, 電学論 B, Vol.135, No.1 pp.42-49 (2014)

- [7] Hironori Kikuchi, Hiroshi Asano, Shigeru Bando : “Load Frequency Control by Commercial Air Conditioners Power Consumption Control with Large Penetration of Renewable Energy Generation”, *IEEJ Trans. PE*, Vol.135, No.4 pp.233-240 (2014) (in Japanese)

菊池 広典・浅野 浩志・坂東 茂:「再生可能エネルギー電源大量連系時の業務用空調機電力制御による負荷周波数制御」, 電学論 B, Vol.135, No.4 pp.233-240 (2014)

- [8] Kazuto Yukita : “Charge Control Method of Plug-in Hybrid Automobile/electric Vehicle in the Micro-grid”, *IEEJ Trans. PE*, Vol.133, No.6 pp.501-504 (2013) (in Japanese)

雪田和人:「マイクログリッドにおける次世代自動車の充電制御手法」, 電学論 B, Vol.133, No.6 pp.501-504 (2013)

- [9] Fujihiro Yamada, Yoshihiko Wazawa, Kazuhiro Kobayashi, Yasushi Miwa, Tomoki Kinno, Kazuto Yukita, Yasuyuki Goto, Katsuhiro Ichiyangi : “Prediction of Next Day Solar Generation by Gray Theory and Neural Networks”, *IEEJ Trans. PE*, Vol.134, No.6 pp.494-500 (2014) (in Japanese)

山田富士宏・和澤良彦・小林和弘・三輪靖・金納朋輝・雪田和人・後藤泰之・一柳勝宏:「灰色理論とニューラルネットワークによる翌日の太陽光発電量予測手法」, 電学論 B, Vol.134, No.6 pp.494-500 (2014)

- [10] Kazuya Okamoto, Shinya Kurisu, Masahiro Utatani, Takeshi Nagata : “A Multi-agent based Electric Power Interchange between Micro-grids”, *IEEJ Trans.*

- PE*, Vol.135, No.3 pp.153-159 (2014) (in Japanese)
 岡本和也・栗栖慎也・歌谷昌弘・永田武：「マルチエージェントによるマイクログリッド間電力融通方式」，*電学論 B*，Vol.135，No.3 pp.153-159 (2014)
- [11] Y. S. Foo, Eddy, H. B. Gooi, S. X. Chen : “Multi-Agent System for Distributed Management of Microgrids”, *IEEE TRANSACTIONS ON POWER SYSTEMS*, Vol.30, No.1 (2014-1)
- [12] Greg Turner, Jay P. Kelley, Caroline L. Storm, David A. Wetz, Wei-Jen Lee : “Design and Active Control of a Microgrid Testbed”, *IEEE TRNSACTIONS ON SMART GRID*, Vol.6, No.1 (2015-1)
- [13] Binyan Zhao, Xiaodai Dong, Jens Bornemann : “Service Restoration for a Renewable-Powered Microgrid in Unsheduled Island Mode”, *IEEE TRANSACTIONS ON SMART GRID*, Vol.6, No.3 (2015-3)
- [14] Duong Tung Nguyen, Long Bao Le : “Risk-Constrained Profit Maximization for Microgrid Aggregators with Demand Response”, *IEEE TRANSACTIONS ON SMART GRID*, Vol.6, No.1 (2015-1)
- [15] K. Temma, Y. Kono, M. Shimomura, M. Karaoka, T. Goda, and S. Uesaka : “Proposal and Development of Power Quality Improvement Method under Islanding Opwration in a Micro-Grid”, *IEEJ Trans. PE*, Vol.126, No.10 pp.1032-1038 (2007-1) (in Japanese)
 天満耕司・河野良之・下村 勝・片岡道雄・合田忠弘・上坂 真：「マイクログリッド自立運転時の電力品質維持手法の提案と開発」，*電学論 B*，Vol.126，No.10 pp.1032-1038 (2007-1)
- [16] T. Shinji, T. Sekine, T. Kashiwagi, A. Akisawa, G. Fujita, and M. Matsubara : “Discussion on Reduction of Power Fluctuation by Distributed Generation in Micro Grid”, *IEEJ Trans. PE*, Vol.126, No.1 pp.14-20 (2006-4) (in Japanese)
 進士誉夫，関根剛史，秋澤 淳，柏木孝夫，藤田吾郎，松原正芳：「分散型電源によるマイクログリッド内の電力変動抑制に関する考察」，*電学論 B*，Vol.126，No.1 pp.14-20 (2006-4)
- [17] K. Takahashi, H. Kita, E. Tanaka, and J. Hasegawa : “A Method for Balancing between Supply and Demand Based on Distributed Autonomous Operation of an

Isolated System in FRIENDS”, *IEEJ Trans. PE*, Vol.126, No.10 pp.1039-1048 (2006-10) (in Japanese)

高橋一仙・北 裕幸・田中英一・長谷川淳：「FRIENDS における自律分散運用に基づく自立系統運転時の需給調整」, 電学論 B, Vol.126, No.10 pp.1039-1048 (2006-10)

- [18] Y. Kojima, M. Koshio, and S. Nakamura : “Development and Evaluation of Control System for Microgrid Supplying Heat and Electricity”, *IEEJ Trans. PE*, Vol.128, No.2 pp.429-436 (2008-2) (in Japanese)

小島康弘・古塩正展・中村静香：「マイクログリッド向け需給制御機能の開発と実証検討」, 電学論 B, Vol.128, No.2 pp.429-436 (2008-2)

- [19] S. Bando, Y. Sasaki, H. Asano, and S. Tagami : “Balancing control method of a microgrid with intermittent renewable energy generators and small battery storage” , *IEEE Power and Energy Society General Meeting – Conversion and Delivery of Electrical Energy in the 21st Century* (2008)

- [20] T. Shimakage, J. Sumita, N. Uchiyama, T. Kato, and Y. Suzuoki : “Supply and Demand Control of Distributed Generators in a Microgrid for New Energy”, *IEEJ Trans. PE*, Vol.128, No.1 pp.143-150 (2008-1) (in Japanese)

島陰豊成・角田二郎・内山倫行・加藤丈佳・鈴置保雄：「新エネルギーの普及を目的としたマイクログリッドにおける分散型電源の需給制御」, 電学論 B, Vol.128, No.1 pp.143-150 (2008-1)

- [21] Y. Hayashi, H. Miyamoto, J. Matsuki, T. Iizuka, and H. Azuma : “Online Optimization Method for Operation of Generators in a Micro Grid”, *IEEJ Trans. PE*, Vol.128, No.2 pp.388-396 (2008-2) (in Japanese)

林 泰弘・宮元英樹・松木純也・飯塚俊夫・東 仁：「マイクログリッドにおけるオンライン需給運用最適化手法」, 電学論 B, Vol.128, No.2 pp.388-396 (2008-2)

- [22] Akira Matsumoto, Ryoichi Hara, Hiroyuki Kita, and Jun Hasegawa : “A Simulation of Generation Investment Planning Development under Competitive Environment”, *IEEJ Trans. PE*, Vol. 128, No. 2, pp. 397-406 (2008-2) (in Japanese)

松本 憲・原 亮一・北 裕幸・長谷川 淳：「競争環境下における電源

開発シミュレーション」, 電学論 B, Vol. 128, No. 2, pp. 397-406

- [23] Richard S. Sutton and Andrew G. Barto, 三上貞芳・皆川雅章 共訳,
“Reinforcement Learning”, 森北出版.

発表文献

- [1] 河又啓, 辻隆男, 大山力 : 「太陽光発電を含むマイクログリッドにおける自律分散型電力取引支援システムの検討」, 電気学会電力技術・電力系統技術合同研究会, PE-12-097, 2012.8.
- [2] 河又啓, 辻隆男, 大山力 : 「デマンドレスポンスを考慮した電力取引支援システムの検討」, 電気学会全国大会, 6-075, 2013.3.
- [3] 河又啓, 辻隆男, 大山力 : 「ローカル系統の電力取引における分散型アプローチの有効性の検討」, 電気学会電力技術・電力系統技術合同研究会, PSE-13-168, 2013.9.
- [4] 河又啓, 辻隆男, 大山力 : 「再生可能エネルギーを含むマイクログリッドにおける自律分散型電力取引支援システムの検討」, 電気学会論文誌 C, Vol.133, No.9, pp.1670-1679, 2013.9.
- [5] Kei Kawamata, Takao Tsuji, Tsutomu Oyama, “Power Trading System in Microgrid based on Mobile Agent Technology”, The Journal of Macro Trends in Energy and Sustainability, Vol.1, Issue 1, 2013.12.