

科学研究費助成事業（科学研究費補助金）研究成果報告書

平成25年5月2日現在

機関番号：10101

研究種目：基盤研究(C)

研究期間：2010年度～2012年度

課題番号：22560260

研究課題名（和文） 系統フレキシビリティ確保のための分散型リソースの貢献度評価と協調インセンティブ

研究課題名（英文） Contribution Evaluation and the Cooperation Incentive of the Distributed Resource for Power System Flexibility

研究代表者

北 裕幸 (KITA HIROYUKI)

北海道大学・大学院情報科学研究科・教授

研究者番号：30214779

研究成果の概要（和文）：

自然エネルギーシステムが大量に導入された電力システムにおいては、これまで以上に系統のフレキシビリティを確保することが必要である。本研究では、電力システムを利用する新規参入事業者や需要家が、自身の小規模電源や負荷（分散型リソース）を、系統フレキシビリティの一部として積極的に提供するような環境を構築することで、系統電源と分散型リソースとが協調し、効果的に系統フレキシビリティを確保する新しい運用体系を開発した。

研究成果の概要（英文）：

Electric power systems with high penetration of natural energy systems such as photovoltaic generations, wind power generations are required to secure more flexibility than usual because those energy resources have intermittent and unpredictable characteristics depending on the weather condition. On the other hand, the new power suppliers or power consumers (distributed resources) can provide the flexibility to power systems because they own the small scale generators or controllable loads. In this study, we developed new framework in which those distributed resources can contribute to solution for some issues caused by high penetration of natural energy systems.

交付決定額

（金額単位：円）

	直接経費	間接経費	合計
2010年度	1,900,000	570,000	2,470,000
2011年度	800,000	240,000	1,040,000
2012年度	800,000	240,000	1,040,000
年度			
年度			
総計	3,500,000	1,050,000	4,550,000

研究分野：電力系統工学

科研費の分科・細目：電気電子工学 電力工学・電力変換・電力機器

キーワード：電力系統，太陽光発電，分散型電源，スマートメータ，系統フレキシビリティ，周波数制御，電圧制御，余剰電力

1. 研究開始当初の背景

地球環境問題、資源制約問題の顕在化に伴い、低炭素型電力供給システムへの期待が高まってきており、今後、太陽光発電や風力発電などの自然エネルギーシステムが電力系統に大量に導入されることが予想される。しかしながら、自然エネルギーシステムは、出力を自在に制御できないだけでなく、自然現象に左右される間歇的な出力特性を持つことから、導入量が増加するにつれて、系統運用上の種々の制約(例えば、電圧制約、周波数制約、需給バランス制約など)を満足できなくなり、ひいては電力の安定供給に深刻な影響を及ぼすことが懸念される。このため、今後の電力系統においては、自然エネルギーシステムの出力変動に柔軟に対応できるような能力(以下、系統フレキシビリティと呼ぶ)をこれまで以上に確保することが不可欠となる。一方、世界の電力産業は自由化の方向に進んでおり、新規参入事業者や一般の需要家が所有する小規模電源や負荷の制御能力を上手に活用することができれば、系統フレキシビリティを効果的に確保することが可能になると考えられる。

2. 研究の目的

本研究では、電力系統を利用する新規参入事業者や需要家が、自身の小規模電源や負荷(分散型リソース)を、系統フレキシビリティの一部として積極的に提供するような環境を構築することで、系統電源と分散型リソースとが協調し、効果的に系統フレキシビリティを確保する新しい運用体系を開発する。また、複数意思決定主体の自己利益最大化の行動を模擬したマルチエージェント型シミュレーションやパラメータ解析によって、提案する運用体系の有効性を多面的に検証し、電力自由化後の低炭素型電力供給システムの望ましい姿を明確にする。

3. 研究の方法

本研究では、自然エネルギーシステム、特に太陽光発電が大量に導入された電力系統において、系統運用上問題となり得る課題：(1)出力変動による系統周波数の変動、(2)逆流による配電網の電圧上昇、(3)軽負荷時における余剰電力の発生を取り上げ、その各々に対して一般電気事業者と多数の系統利用者とが誘導価格に基づき協調して対処する新しい運用体系を確立する。研究の方法は、まず、一般電気事業者から見た誘導価格の合理的な決定手法を開発し、次に、決定された誘導価格に基づいて系統利用者の行動をマルチエージェント型シミュレーションにより模擬することにより、その有効性を検証する。特に、誘導価格に基

づく運用は、原理的には系統利用者および一般電気事業者の双方にメリットを与える可能性を持つものであり、シミュレーションを通してその妥当性を詳細に検証する。

4. 研究成果

本研究では、電力系統を利用する新規参入事業者や需要家が、自身の小規模電源や負荷(分散型リソース)を、系統フレキシビリティの一部として積極的に提供するような環境を構築することで、系統電源と分散型リソースとが協調し、効果的に系統フレキシビリティを確保する新しい運用体系を開発することを目的として実施した。特に、太陽光発電が大量に導入された電力系統における以下の3つの課題の観点から、系統フレキシビリティを確保するための運用体系について検討を行った。

(1)出力変動による系統周波数の変動抑制：

系統周波数の変動の大きさに応じた報奨金を提示することで、新規参入事業者や需要家がこの報奨金を動機として自発的かつ自律的に分散型リソースを制御し、周波数変動抑制へ協力する枠組みを提案しその有効性を明らかにした。

①報奨金単価[円/kWh]の計算手法の開発：

電力系統においては、系統全体の需給アンバランスを表す周波数偏差をフィードバックし、比例制御および積分制御によって発電電力を調整し、需給バランスを図っている。本研究の報奨金単価も、従来の需給バランス制御と同様の制御が達成されることを期待して、周波数偏差に比例させる項と、周波数偏差の積分量に比例する項の二つで構成することを考え、その具体的な計算手法を開発した。

②経済主体の貢献電力量[kWh]の計算手法の開発：

各経済主体の電力を消費する行動あるいは電力を発生するという行動のうち、どの部分が需給バランスのルールを違反した行為になるのか、またどの部分が需給バランスの維持に貢献した行為になるのかについて、明確に切り分けることは難しい。そこで本研究では、各経済主体が事前に発電量あるいは需要量を市場に入札し、市場決済が行われた後の状態をベース状態とした。すなわち、市場取引の段階では需要と供給が一致しているため、実際にその通りに行動すれば系統の需給バランスには何の影響も及ぼさないことになる(ペナルティも報酬も発生しない)。これにより、需給バランスのルールを違反した行為あるいは貢献した行為を、市場取引で

決まったベース状態からの偏差分と定義することができ、その偏差に対してペナルティあるいは報酬金を賦課することとした。

③各経済主体の行動のモデリング：

与えられた報奨金単価に基づき、発電事業者および需要家が当初の発電および需要の計画値をどれだけ変更するかは、自身の利益最大化に基づいて決まるものと考えられる。そこで、発電事業者については、計画変更に伴う報奨金収入－計画変更に伴う燃料費の増分が最大となるように、需要家については計画変更に伴う報奨金収入－計画変更に伴う需要家の効用減少分が最大となるように、発電量および負荷量を変更するものとして、各経済主体の最経済な行動をモデリングした。ここで、発電機の燃料費関数は、例えば2次関数などで記述することができるが、需要家の効用関数については正確にはわからないため、価格弾力性を表す係数をパラメータとして変えながら算定した。

④発電機及び負荷の制御遅れの考慮：

各経済主体の行動は、発電出力あるいは負荷電力変更の指令値を計算したものであり、実際の発電機あるいは負荷が動作するまでには応答遅れなどがある。そこで、各機器の特性を考慮した実際の発電電力、負荷電力を計算する手法を開発した。

⑤周波数制御シミュレーション：

提案する需給運用方式の妥当性を検証するとともに、その特徴を定量的に把握するためにMATLAB/Simulink上で周波数制御の時系列シミュレーションを行った。その結果、提案する周波数制御手法により分散電源が周波数制御に貢献し得ることを確認した。また、報奨金の原資を罰金から賄えることを確認した。しかし、報奨金単価の決定係数の値によりその制御性は異なり、適切な報奨金単価の決定係数を設定する必要がある。特に、この決定係数が大きな値となった場合、分散電源による過剰な制御が行われ系統の需給バランスが大きく崩れることが確認された。そのため、決定係数は慎重に選ばれる必要がある。

⑥今後への展望：

本研究で想定した状況は、系統に接続されるすべての分散電源と需要家が電力市場取引に参加していることを想定している。もしも一部の需要家が取引に参加していない場合、報奨金の原資が賄えない状況が想定される。そのような場合、報奨金制度に参加していない経済主体から不足分をアンシラリーサービス料金として平等に徴収する必要性が出てくる。その場合どのようにして公平に分配するのが問題となると考えられる。ま

た、本研究では周波数制御への貢献量を契約電力からの変更電力量と定義しているが、単位時間当たりの出力変更量と定義することで、電力市場に限定されずに、より広い範囲で適用可能なLFC制御を行える可能性がある。しかし、その場合には系統周波数の予測が必要となり、より複雑な意思決定が必要となると考えられる。今後は本研究で提案した手法との比較などを行い、より良い報奨金制度を考えていく必要がある。

(2)逆潮流による配電網の電圧上昇抑制：

①需要家側蓄電池の制御による電圧制御手法の開発：

需要家側蓄電池の有効・無効電力制御によって、従来の静止型無効電力補償装置(SVC)よりも高い電圧制御効果が得られることを明らかにした。すなわち、需要家側の分散型リソース(この場合、蓄電池)を上手に活用できれば、高い系統フレキシビリティを確保できることを確認した。

②リアルタイム電気料金による需要家側のマネジメント手法の開発：

太陽光発電が大量に導入された電力系統において、一般電気事業者と多数の需要家が協調して対処する新しい運用体系を確立した。開発した運用手法は、各需要家に設置されているスマートメータが受電点電圧をオンラインで観測し、その値の基準値からの偏差に応じてリアルタイムに価格を設定するものである。すなわち、太陽光発電の発電量が多く、大きな逆潮流が発生する時間帯では電圧の上限逸脱の危険度が高くなる。そこで、配電系統内での需要が増加するように価格を安く設定する。反対に、太陽光発電の発電量が少ない状態で需要が増加すると、電圧の下限逸脱の危険度が高くなるため、需要量が減少するように価格を高め設定する。その際、需要家の接続位置によって需要家の電気料金の支払額に差異が生じることを避けるため、各需要家位置によって価格決定時の基準電圧値を変更することを考慮した。

③電圧制御シミュレーション：

1日24時間帯に対して提案したリアルタイム電気料金制度を適用し、その効果を検証した。提案手法により電圧が適正範囲内に収まるように需要を誘導することができることを確認した。また受電点の位置の異なる需要家であっても、ほぼ同様の需要曲線となっていることから、需要家間の利益不均衡もある程度回避できているといえる。

④今後への展望：

リアルタイム電気料金は、前日の太陽光発電の予測値を用いて、その形状を設計するこ

とになる。このため、当日の予測誤差が、電圧制御にどのような影響を与えるのかを解析するとともに、予測誤差に対してロバストなリアルタイム電気料金の設計手法について検討を行うことが必要である。

(3) 軽負荷時における余剰電力の解消：

出力が不安定な多数の太陽光発電を含む配電系統において、各需要家に設置されるスマートメータ並びにそれらを連携する双方向情報通信ネットワークを用いて、各家庭における家電機器を制御することで、太陽光発電大量連系に伴う電圧逸脱問題を解決しつつ、余剰電力を解消可能な運用管理システムを構築した。

①スマートメータに基づくエネルギーマネジメント手法の開発：

各需要家に設置されたスマートメータでは、低圧配電系統内で電圧逸脱が発生しないように、自律的に各家庭における電力消費スケジュールを作成することとした。ここで、協同的かつ効果的なスケジューリングを実現するために次の仮定をおいた。

- ・各スマートメータは設置された宅内の情報通信ネットワークを介して、家庭内の家電機器の電力消費パターンの計測・制御が可能である。
- ・各スマートメータは情報通信ネットワークを通じて、配電系統運用者とも双方向の情報交換が可能である。
- ・各スマートメータは系統運用者から配信される情報を基に、同一低圧配電系統内の他の需要家の電力消費スケジュールを考慮しつつ、電圧逸脱を回避するように自宅の翌日の電力消費スケジュールを作成する。

②情報交換とスケジューリングの流れ：

各スマートメータが電力消費スケジュールリングを行う際には、他の需要家の情報や系統の潮流状況や電圧の情報が必要となる。これらの必要な情報は需要家間のプライバシー保護ならびに取り扱うデータの性質から、全て配電系統運用者で集約し、適切にマスクした後、需要家側に配信することとした。すなわち、提案手法では、各需要家のプライバシー保護の観点から情報交換は各スマートメータと系統運用者の間に限定し、スマートメータ同士の直接的な情報交換は行わないものとした。

提案するエネルギーマネジメントシステムでは、各需要家の所有するスマートメータが、同一低圧配電系統上の他の需要家の電力消費スケジュールを考慮しつつ、自身の利益を最大化（あるいは支出を最小化）するように自

宅における家電機器の電力消費スケジュールを決定する。一般的に、同一低圧フィーダに複数の需要家が連系されている状況では、需要家種別は戸建住宅が多いと考えるのが妥当であろう。そこで2012年7月から施行されている「再生可能エネルギーの固定価格買取制度」に則り、PV発電電力の買取には余剰電力買取制度が適用されているものとした。

③シミュレーションと今後への展望：

シミュレーションにより、余剰電力を自家消費することで、PV出力抑制を回避することができ、無駄のないエネルギー利用が達成できることが明らかになった。また、逆潮流による低圧配電系統の電圧逸脱を解消するとともに、需要家側の利益最大化・公平化やエネルギー利用率の向上にも貢献できることを確認した。

今後の展望としては、余剰電力削減の公平性に対するもう一つの考え方として、余剰電力量の大きさに比例して削減量を決定する手法を検討する予定である。また、本研究では低圧フィーダでの評価に留まっているため、高圧フィーダ側への影響を考慮した検討と手法の開発が必要である。

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)

[学会発表] (計15件)

①丹野 剛, 原 亮一, 北 裕幸, 田中英一：
「リアルタイム電気料金を用いた需要家側制御による配電系統電圧管理に関する検討」, 平成25年電気学会全国大会, 平成25年3月21日, 名古屋大学(名古屋市)

②小玉志樹, 原 亮一, 北 裕幸, 田中英一：
「配電系統への太陽光発電導入に伴う電圧上昇解消のための需要家側エネルギーマネジメントに関する研究」, 電気学会電力系統技術研究会, PSE-13-008, 平成25年1月29日, 熊本大学(熊本市)

③丹野 剛, 原 亮一, 北 裕幸：「リアルタイム電気料金を用いた需要家側制御による配電系統電圧管理に関する基礎検討」, 平成24年度電気・情報関係学会北海道支部連合大会, 平成24年10月20日, 北海道大学(札幌市)

④金田 慎一, 原 亮一, 北 裕幸, 田中英一：
「報奨金制度に基づく自律分散型負荷周波数制御 —需要家機器の応答遅れによる影響—」, 平成24年度電気・情報関係学会北海道支部連合大会, 平成24年10月20日, 北海

道大学(札幌市)

⑤小玉志樹, 原 亮一, 北 裕幸, 田中英一 : 「配電系統における複数の需要家側 EMS 間の協調運用に関する研究」, 平成 24 年電気学会電力・エネルギー部門大会 (論文 II), 平成 24 年 9 月 21 日, 北海道大学(札幌市)

⑥大澤潤騎, 原 亮一, 北 裕幸, 小暮英二, 平岩直哉, 神谷英志, 三栗祐己 : 「配電系統における蓄電池導入効果の検討」, 平成 24 年電気学会全国大会, 平成 24 年 3 月 22 日, 広島工業大学(広島市)

⑦小玉志樹, 原 亮一, 北 裕幸, 田中英一 : 「スマートメータを用いた需要家側エネルギーマネジメントシステムの高度化に関する検討」, 平成 24 年電気学会全国大会, 平成 24 年 3 月 22 日, 広島工業大学(広島市)

⑧小玉志樹, 原 亮一, 田中英一, 北 裕幸 : 「スマートメータを用いた需要家サイドのエネルギーマネジメントシステムの高度化に関する基礎検討」, 平成 23 年度電気・情報関係学会北海道支部連合大会, 平成 23 年 10 月 22 日, はこだて未来大学(函館市)

⑨大澤潤騎, 原 亮一, 北 裕幸, 小倉英二, 平岩直哉, 神谷英志, 三栗祐己 : 「配電系統における蓄電池を用いた電圧管理・負荷平準化の基礎検討」, 平成 23 年度電気・情報関係学会北海道支部連合大会, 平成 23 年 10 月 22 日, はこだて未来大学(函館市)

⑩藤岡浩史, 原 亮一, 北 裕幸 : 「配電系統におけるオンライン PV 出力推定に基づく LRT と蓄電池による協調制御」, 平成 23 年度電気・情報関係学会北海道支部連合大会, 平成 23 年 10 月 22 日, はこだて未来大学(函館市)

⑪藤岡浩史, 原 亮一, 北 裕幸 : 「オンラインフィードバック電圧情報に基づく PV 出力推定を用いた配電系統電圧適正化への応用の基礎検討」, 電気学会電力技術・電力系統技術合同研究会資料, PE-11-106/PSE-11-123, 平成 23 年 9 月 28 日, 大阪工業大学(大阪市)

⑫金田慎一, 原 亮一, 田中英一, 北 裕幸 : 「報奨金制度に基づく自律分散型負荷周波数制御に関する検討」, 電気学会電力技術・電力系統技術合同研究会資料, PE-11-151/PSE-11-168, 平成 23 年 9 月 28 日, 大阪工業大学(大阪市)

⑬藤岡浩史, 原 亮一, 北 裕幸 : 「電圧推定誤差を用いた配電系統内 PV 出力推定精度

についての検討」, 平成 23 年電気学会電力・エネルギー部門大会 (論文 II), 平成 23 年 8 月 31 日, 福井大学(福井市)

⑭藤岡浩史, 原 亮一, 北 裕幸 : 「電圧推定誤差を用いた配電系統内 PV 出力推定」, 平成 23 年電気学会全国大会, 平成 23 年 3 月 16 日, 大阪大学(豊中市)

⑮金田慎一, 原 亮一, 田中英一, 北 裕幸 : 「報奨金制度に基づく自律分散型負荷周波数制御」, 平成 23 年電気学会全国大会, 平成 23 年 3 月 16 日, 大阪大学(豊中市)

6. 研究組織

(1) 研究代表者

北 裕幸 (KITA HIROYUKI)
北海道大学・大学院情報科学研究科・教授
研究者番号 : 30214779

(2) 研究分担者

原 亮一 (HARA RYOICHI)
北海道大学・大学院情報科学研究科・
准教授
研究者番号 : 80361872

田中 英一 (TANAKA EIICHI)
北海道大学・大学院情報科学研究科・助教
研究者番号 : 10124538