

エネルギーシステムの発展と スマートグリッド

荻本 和彦, 池田 裕一

将来の電力システムとして期待されるスマートグリッドでは、出力の変動する再生可能エネルギーの増加により需給変動要因が増加すると同時に、ベース電源増加の要素が加わり、出力調整に適した火力発電などが減少し、電力システム全体の需給調整力が低下する。電力システムを安定に運用するためには、発電の供給と需要を予測する技術、需要を能動的に管理する技術、これらを統合した計画・運用システムが必要になる。本稿では、電力システムにおける技術的な課題を整理したうえで、数理モデルを用いた電力システムの解析事例と構想を説明する。

キーワード：スマートグリッド、再生可能エネルギー、Lagrange 緩和法、混合整数計画問題

1. はじめに

地球の気温上昇を今後2度以内に抑えるためには、2050年時点の二酸化炭素(CO₂)の排出量を今日の半分に抑制する必要があると評価されている。全世界の経済システムを対象とする均衡モデルを用いたエネルギーシステム解析から、電力システム(系統)において最も多いCO₂排出削減が期待されるとの結果が報告されている[1]。この削減内訳を見ると、CO₂を回収・貯蔵する設備を備えた火力発電のほか、風力や太陽光などの再生可能エネルギーを利用する発電、原子力発電、さまざまな省エネ技術による削減寄与が半分以上を占めている。

このため、将来の電力システムでは、気象条件によって出力の変動する風力や太陽光などの再生可能エネルギーや、出力一定運転を基本とする原子力などのベース電源の割合が増える一方で、火力発電などの減少によって電力供給の調整力が低下してしまう。将来の電力システムを安定に運用するためには、発電の供給と需要を予測する技術、需要を能動的に管理する技術、これらを統合した運用システムが必要になる。本稿では、このような技術課題を整理したうえで、数理モデルを用いたスマートグリッド解析の事例と構想を説明する。

おぎもと かずひこ, いけだ ゆういち
東京大学 生産技術研究所 人間・社会系部門 エネルギー
工学連携研究センター
〒153-8505 目黒区駒場4-6-1

2. 電力システムの基礎知識

2.1 電力システムの計画業務

電力は長期的な貯蔵が困難な「生もの」なので、各時点での需要と供給がバランスしていなければならない。電力需要は、経済システムにおける全生産量によって決まる。したがって、その需要を満たすように供給するための計画が必要となる。計画業務では、電力需給計画および電力設備計画が策定される[2]。

諸計画の策定に先立ち、まず経済分析により電力需要を想定する。電力需給計画では、想定した需要を満たすように、水力・火力・原子力の発電および補修計画、他社受電および電力融通計画など、運用期間に応じた複数の需給計画が策定される。電力設備計画では、電源開発計画や送変電設備計画など、設備形成のための投資計画が策定される。一連の計画策定において、経済性を確保しながら供給に支障を生じないようにする予備力確保分析や発電ユニットの起動停止計画問題、発電費用が最小になるように電源構成を決める経済負荷配分解析など多くの解析技術が使われている。

2.2 電力システムの運用業務

需給バランスが壊れると、供給する交流電力の周波数が変動して、需要家の生産設備へ悪影響が出るだけでなく、広い地域にわたる停電を引き起こすことがある。このような事態を避け安定した電力供給を行うために、電力システムの運用では、供給側の集中エネルギーマネジメントが行われる。

需給バランスをとるには、発電所、変電所、送電線などの設備が、それぞれ与えられた役割を果たすこと

が必要である。そのため、業務ごとに指令系統や操作の手順が決められており、各電力会社の中央給電指令所から、さまざまな給電指令が出されている。需給運用では、各発電所に対して、発電機の並解列や出力調整が指示される。また、系統運用では、開閉器操作や負荷制限・抑制や電圧調整が指示される[2]。

2.3 次世代電力システム

「時代の要請」と「技術革新」に基づく次世代電力システム概念は、スマートグリッドと呼ばれる[3][4]。その実現形態は、再生可能エネルギー発電を含む電源と需要の地理的分布や構成、既存ネットワークなど、それぞれ電力システム特性により多様であると予想される。スマートグリッドにおける電力技術としての革新的部分は、集中エネルギーマネジメントとして専ら供給側で行われてきた電力需給バランスの調整を、需要側も分散エネルギーマネジメントにより自らの需要を能動的に管理する点である[5][6]。

3. 次世代電力システムの技術課題

3.1 競争環境

海外では、電力市場の自由化により電力会社の水平分業化が進み、様々な事業主体が競争・協調的に設備を設置して系統運用を行うように事業環境が変化した。その結果、事業の不確実性が高まり、計画、運用における情報伝達の制約による問題が顕在化してきた。1990年代に米国で発生した大規模停電を契機に、保守のための計画停止などを考慮した電力システムの基本的な供給能力であるアデカシー、機器の故障などの事故が生じてても系統安定を保つ能力であるセキュリティが注目されており[7]、次世代電力システムにおいては、アデカシーとセキュリティを考慮したシステム化が必要となる。

また、電力取引におけるスポット市場、リアルタイム市場などでも取引量が増えており、オーストラリアでは発電予測技術の特性から、風力発電を対象として5分前入札が行われている。そのため、需要予測について、短時間予測の手法へのニーズが高まっている[8]。

3.2 供給側の変化

エネルギー供給の安定化と低炭素化を実現するために、次世代電力システムであるスマートグリッドでは着実な変化が求められている。例えば、太陽光発電(Photovoltaic, PV)や風力発電の大量導入が検討されているが、実現に向けて解決しなければならない技術課題がある。

PV発電や風力発電の出力は、基本的には季節や時刻による周期的な変動に加え、天候の変化によって不規則に変動する。そのため、給電指令による出力制御が不可能な電源である。ただし、発電出力を抑制する調整は可能である。これらの再生可能エネルギー発電の増加は、需給バランスを崩す要因であるとともに、電力システム全体の需給調整を現在担っている火力などの運転台数の減少という電力システムの需給調整力減少の要因となっている。ヨーロッパでは、風力発電が数千万kWの規模で導入され、様々な課題が顕在化している[9]~[11]。

原子力発電や石炭ガス化複合発電は、技術的には出力調整が可能であるが、低廉な電力供給や機器の劣化の軽減の観点から、一定出力運転のベース電源としての運用が望ましい。これらベース電源の容量増加は、電力システムの需給調整力の一層の減少要因となる。したがって、再生可能エネルギー発電の導入が拡大し供給側での変動要因が増加する中で、電力システムの需給調整力を維持するためには、次節で説明する分散エネルギーマネジメントのような新たな施策が必要で

表1 PV大量導入の課題と対策

	課題	現象の説明	対策
配電系統	配電系統の電圧変動	PV発電量が大きい場合、PVから系統側への逆潮流により、配電系統の電圧が上昇する。	*配電系統の電圧制御 *PVインバータの無効電力調整 *配電電圧昇圧
	事故時の単独運転継続	系統側事故で、PV発電量と需要がバランスして運転継続し、復旧が遅れる。	*新しい制御・保護方式の適用
系統全体	周波数の変動	常時のPV発電量の変動で電力需給のバランスが崩れ系統周波数が変動する。	*PVの発電特性把握 *火力・水力などの調整容量の活用 *蓄電池の充放電機能の活用
	需給運用の困難化、余剰電力の発生	低需要期でのPVの最大発電時に、系統の火力発電機が減少し需給調整力が低下する、または余剰電力が発生する。	*PVの発電量予測技術 *揚水発電所の活用 *蓄電設備の設置 *PVの出力抑制
	火力機(同期機)の減少による系統安定度の低下 系統事故時のPVの一斉解列	同期機の発電割合が減り、系統事故時など、系統全体の同期運転が困難になる。 系統事故による広域瞬時低電圧発生時に、多数のPVのインバータが運転継続できず、需給バランスが崩れる。	*現象自体の発生から検討が必要 *事故時運転継続機能を備えたインバータの開発 *単独運転防止装置の誤作動防止

*:今後の技術開発を伴う対策

ある。表1に、PV大量導入時の電力システムにおける課題と対策をまとめる[5]。

3.3 需要側の分散エネルギーマネジメント

「需要側」でも、従来、深夜時間帯の割引料金、系統事故時の契約に基づく負荷遮断などが行われてきた。スマートグリッドにおいて導入が検討されている分散エネルギーマネジメントでは、新しい技術と制度の導入の組み合わせにより、需要を能動的に管理する。

家庭や業務ビルにおいて、建物の一般の空調、駆体蓄熱を利用した空調、冷蔵庫や洗濯機の需要などは、特定の時間に電気を使用する要求が低いため、一定の電力需要シフトの可能性を持つ。また、現在導入が進んでいるヒートポンプ給湯システムは、貯湯槽があることから温水をつくるための電気の使用時間をある程度自由に選択できる。今後、PV、燃料電池コジェネレーション（熱電併給）などの分散電源、さらにはバッテリーなどの電力貯蔵技術の普及が進んだ段階では、需要側による需給調整力の向上が期待される。

住宅や業務用建物における電力需給を能動化し、電力システム全体の需給との協調運転を実現するためには、建物など様々な単位での需要機器の運転を総合的に管理する分散型エネルギーマネジメント技術が必要となる。図1に、集中/分散エネルギーマネジメントの協調の概念を示す[5]。

この集中/分散のエネルギーマネジメントによる需要の能動化を通して、再生可能エネルギーの大規模導入時の出力変動の調整能力を向上することが、スマートグリッドの核心部分である。これらの実現には、PVシステムのインバータ制御、発電特性分析・発電予測に加え、直接・間接制御のための情報通信技術、

分散エネルギーマネジメントと対応機器の開発、それらをつぶ情報通信技術を含め、広範な標準化が必要となる。

4. 数理モデルを用いた電力システムの解析事例と構想

4.1 PVのならし効果と電力需給への影響

PVの個別システムの発電特性は、季節と時間に基づく周期的な変動に加え、設置場所での天候の変化による不規則な変動を有している。しかし、系統全体の需給バランスに与える影響を考える場合は、多数の小規模なPVシステムが広域に分散設置されるために、地域的な広がりにより個別の発電量の変動が相殺し合計の発電量の変動が緩和される。この変動緩和は、ならし効果（smoothing effect）と呼ばれる。ならし効果の概念を、図2を用いて説明する。各地点における日射量は時刻によって大きく変動するが、多数の地点における日射量の平均値は比較的スムーズな時間変化をしている。ならし効果は、多くの地点における日射量の変動が無相関であることに基づいている。

今後、PVが一定規模以上導入された段階での、ならし効果を含めた系統全体でのPVの発電特性を評価するためには、不均等に分布した観測点における個別の発電量から合計発電量を算出する方法が必要となる。

系統全体の需給バランスの視点から、PVの電力システムへの導入に伴う系統全体の周波数の変動、需給運用の困難化・余剰電力の発生などの課題の検討のために、数理モデルを用いた解析が有効である。本節では、最大需要約60GWのモデル系統に19GWのPVが導入された場合について、1時間データに基づく電

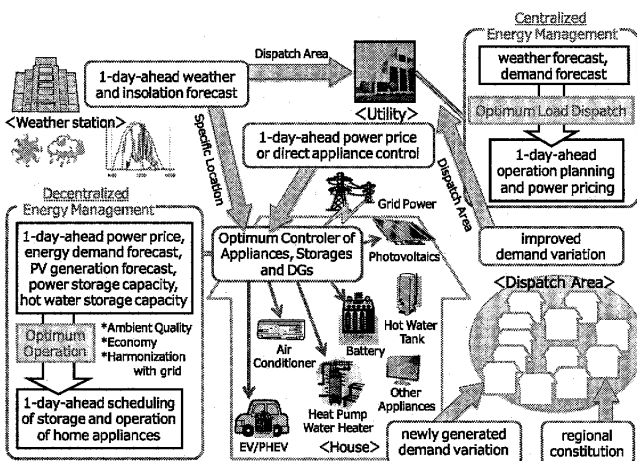


図1 集中/分散エネルギーマネジメント

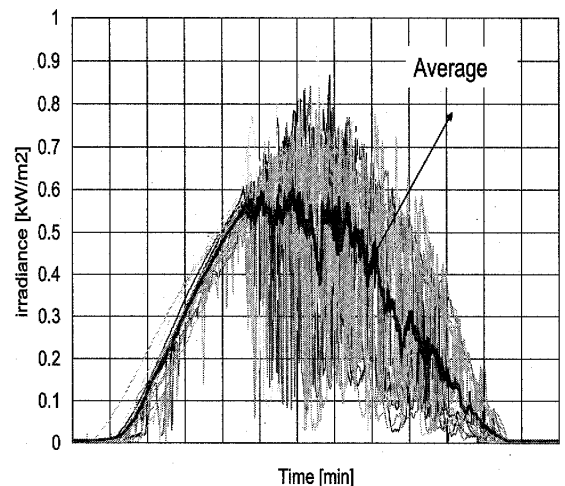


図2 ならし効果

力需給に対する電力貯蔵装置の効果について解析した事例を説明する[12].

まず、時刻 t における PV 出力 P_t に、分散型電力貯蔵装置の充電 C_t 、放電 D_t をそれぞれ加減して、正味の出力

$$V_t = P_t + D_t - C_t \quad (1)$$

を定義する。電力システムの本来の需要 L_t から V_t を引いた量を、供給側から見た需要として、等価需要と呼ぶ。昼間（晴天）の等価需要は、 $L_t - (P_t - C_t)$ となり、 $C_t \leq P_t$ なので本来の需要 L_t よりも小さい。さらに、夕方の等価需要も、 $L_t - D_t$ となり、本来の需要 L_t より小さくなる。その結果、等価需要の偏差は、本来の需要の偏差よりも小さくなる。したがって、PV の普及が進み、その経済価値が大きくなるほど、等価需要の偏差が小さくなるのが分かる。電力価格 p_t が、 a を定数として、

$$p_t = a(L_t - V_t) \quad (2)$$

のように等価需要に比例する場合、PV 発電の経済価値を最大化

$$\max_{C_t, D_t} \sum_{t=1}^T [V_t(L_t - V_t)] \quad (3)$$

するように充電 C_t 、放電 D_t を求めることにより、電力貯蔵装置の運用計画を立案できる。ただし、次の制約条件

$$S_t = S_{t-1} + KC_t - D_t, \quad (4)$$

$$C_t \leq C^{max}, \quad (5)$$

$$D_t \leq D^{max}, \quad (6)$$

$$S_t \leq S^{max}, \quad (7)$$

$$C_t \leq P_t, \quad (8)$$

$$D_t \leq S_{t-1}, \quad (9)$$

$$C_t D_t = 0 \text{ (同時充放電禁止)}, \quad (10)$$

$$0 \leq C_t, \quad (11)$$

$$0 \leq D_t, \quad (12)$$

を考慮する。ここで、 S_t, K, T は、それぞれ電力貯蔵量、充電効率係数、検討期間である。

図3に、(2005年で所与とする) 原子力、石炭、天然ガス、石油、水力、揚水という電源種別の設置容量と、5月の条件での等価需要を重ねて表示する。5月は、需要が低い中間期において比較的日射が強いという特徴がある。毎時の需要、各PVの導入レベルを100% (19GW)、80%、60%、40%、20%とした場合のPV発電電力および等価需要を示している。需要の低いゴールデンウィークの期間に、等価需要がもとの需要の最低値より小さくなり、通常一定出力運転を行

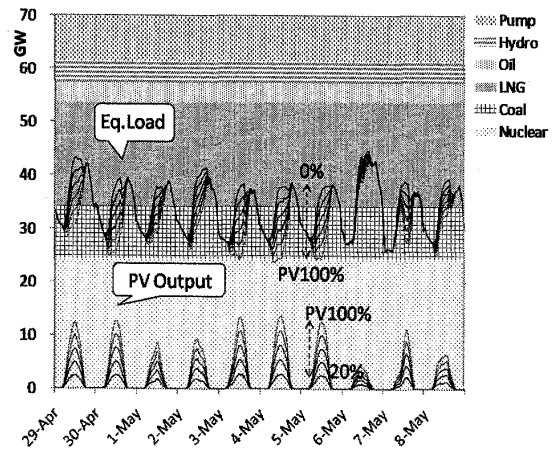


図3 5月の等価需要

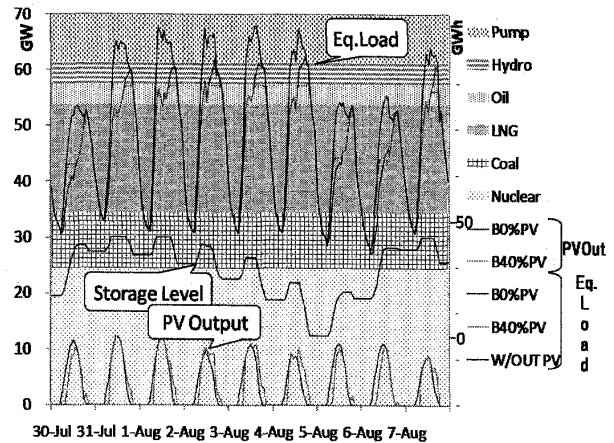


図4 8月の等価需要

う原子力発電の領域まで低下し、需給調整が難しい状況になることが示されている。

図4は、蓄電装置の効果の例として、8月（貯蔵容量40%、充放電容量40%）の条件での解析結果である。電力貯蔵装置により等価需要の年間の最大値を抑制する運用により、等価需要が低い時間帯に充電を行い、貯蔵なしの場合に発生する夕方のピーク需要を抑制することが分かった。

4.2 PV 発電予測とユニットの起動停問題

スマートグリッドにおいて大量導入されるPV・風力発電の発電量の予測は、電力需要の変動と発電機や送電線の事故などと重畳して、電力システムの需給運用に影響を与える。米国 Argonne 国立研究所の報告書では、図5に示すように、電力システムの前日、当日の運用において、風力発電予測が適用されている[13].

したがって、PV 発電予測を電力システム運用に適用するためには、将来の時点でのPV発電量の予測値が期待値、標準偏差、自己相関関数の時定数などを再

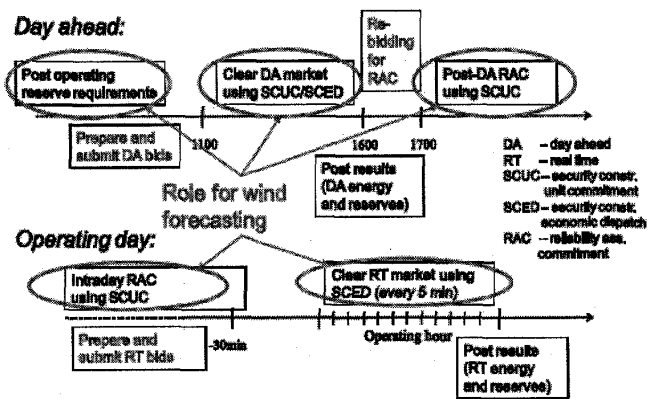


図5 運用スケジュールと風力発電予測

現することが必要である。上記の時定数よりも短い時間スケールまでは過去の時系列の値を用いて予測できる可能性が高く、時定数よりも長い時間スケールでは時系列はランダムであるので予測困難となる。

また、対象が単一地点の場合は該当箇所の予測で十分であるが、電力システム全体の需給調整力の評価のためにはならし効果を考慮した合計の発電量を評価する必要がある。必要な予測精度は、電力システムの需給調整力の大きさと速さに依存すると考えられ、詳細な検討が必要である。

再生可能エネルギーの発電予測技術を開発するには、直近の時点までの長期間における、気象一般、日射、風況などの観測データ、既設発電システムの発電実績データが必要である。データの時間ステップは、自己関連の時定数を評価できる程度に小さいことが望ましい。

図5に示すように、前日の運用では、電力市場メカニズムの中で、発電予測結果を使って運用計画（発電ユニットの起動停止計画など）を作成している。起動停止問題を一括して解く場合には、主に火力発電ユニットを対象にして、需給バランスなどの制約条件を満たしながら、ユニットの起動コストなどを考慮して、燃料コストを最小にする各ユニットの稼働状態を時系列として求める。その問題の概要は、次のように定式化できる。需給バランス条件は、

$$P_{load}^t - \sum_{i=1}^N P_i^t U_i^t = 0, \quad (13)$$

である。ここで、 P_{load}^t 、 P_i^t は、それぞれ時刻 t における需要、ユニット i の出力である。また、変数 U_i^t は、稼働 (=1)、停止 (=0) を表す整数変数である。出力 P_i^t は、制約

$$U_i^t P_i^{min} \leq P_i^t \leq U_i^t P_i^{max}, \quad (14)$$

を満足する。さらに、出力 P_i^t を得るのに必要な燃料コストを $F_i(P_i^t)$ 、起動コストを S_i^t とすると、目的関数 $F(P_i^t, U_i^t)$ は

$$F(P_i^t, U_i^t) = \sum_{t=1}^T \sum_{i=1}^N [F_i(P_i^t) + S_i^t] U_i^t, \quad (15)$$

のように与えられる[14]。

さまざまな起動停止問題の解法が研究されているが[15][16]、本稿ではLagrange緩和法について説明する。Lagrange関数は

$$\mathcal{L}(P, U, \lambda) = F(P_i^t, U_i^t) + \sum_{t=1}^T \lambda^t (P_{load}^t - \sum_{i=1}^N P_i^t U_i^t), \quad (16)$$

と書くことができ、Lagrange緩和法では

$$q^*(\lambda) = \max_{\lambda} q(\lambda), \quad (17)$$

$$q(\lambda) = \min_{P_i^t, U_i^t} \mathcal{L}(P, U, \lambda), \quad (18)$$

のように、問題を2段階に分解する。式(18)に式(15)、(16)を代入すると、

$$q(\lambda) = \sum_{i=1}^N r(\lambda), \quad (19)$$

$$r(\lambda) = \min_{P_i^t, U_i^t} \sum_{t=1}^T \left\{ [F_i(P_i^t) + S_i^t] U_i^t - \lambda^t P_i^t U_i^t \right\}, \quad (20)$$

を得る。式(20)から、個別の発電ユニットについての混合整数計画問題を解くことにより、 $r(\lambda)$ が得られることが分かる。実際の計算では、所与の λ^t について、式(18)を計算して、

$$\lambda^{t+1} = \lambda^t + \left[\frac{d}{d\lambda} q(\lambda) \right] \alpha, \quad (21)$$

により、式(19)を満たすように λ^t を更新する。この2段階の手順を、収束するまで繰り返す。ここで、 α は収束の速さを決めるパラメータである。

従来の起動停止問題では、需要 P_{load}^t は時間について緩やかに変動する関数なので、時間ステップは1時間程度で十分であった。しかし、風力発電を大量導入する将来の電力システムにおいては、等価需要 P_{load}^t は時間について不規則に変動する。そのため、時間ステップを自己相関関数の時定数程度に短くして、風力発電の発電量の変動による等価需要の変動を確率的に取り扱うことができるような起動停止問題を検討する必要がある。

また、先に述べたスマートグリッドにおける集中/分散エネルギーマネジメントの協調による需要の電動化など新しい技術、運用方法などを反映する必要もある。

5. おわりに

将来の電力システムでは、出力の変動する再生可能

エネルギーの割合が増える一方で、火力発電などの減少により電力供給の調整力が低下する。電力システムを安定に運用するためには、発電の供給と需要を予測する技術、需要を能動的に管理する技術、これらを統合した運用システムが必要になり、これらが多様な技術を包含することがスマートグリッドの電力技術としての革新的部分である。

数理モデルを用いた解析の事例として、PVのならし効果と電力需給への影響を説明した。さらに、解析の構想として、PV発電予測と発電ユニットの起動停止問題について説明した。

今後、発電予測や分散エネルギーマネジメントなどの相互作用を含めた電力システムの計画・運用問題などの解析ツールを開発し、分析・評価などの研究を進め、時代の要請に応えることができる将来の電力システムのありかたを追及してゆきたい。

参考文献

- [1] 国際エネルギー機関 (IEA): Energy Technology Perspectives 2010 (2010).
- [2] 電気学会: 電力システムの利用を支える解析・運用技術, 電気学会技術報告 1100号 (2007).
- [3] DOE (U.S. Department of Energy): Smart Grid System Report (2009).
- [4] NETL (National Energy Technology Laboratory): Understanding the Benefits of Smart Grids (2010).
- [5] 荻本和彦: 再生可能エネルギーの大規模導入を支えるスマートグリッドの展開, 第38回日本ガスタービン学会定期講演会 (徳島) 講演論文集 (2010).
- [6] 荻本和彦, 関知道, 平口博丸, 林宏典: 再生可能エネルギー導入における電力システムの課題, 発電予測研究会, MES-11-001 (2011).
- [7] 宮内肇, 北裕幸, 石亀篤司: 競争環境下での電力系統解析技術, 電学論 B, Vol. 127, No. 10, pp. 1056-1059 (2007).
- [8] 山本敏之, 横山明彦, 本田祐輔, 藪田浩史, 吉田潔史: EDC 制御分担を考慮した短時間先電力需要予測, 電学論 B, Vol. 125, No. 1, pp. 39-44 (2005).
- [9] L. Soder, L. Hofmann, A. Orths, H. Holttinen, Y. Wan and A. Tuohy: Experience From Wind Integration in Some High Penetration Areas, Energy Conversion, IEEE Transactions on, Vol. 22, No. 1, pp. 4-12 (2007).
- [10] IEA Task 25 Final report: Design and operation of power systems with large amounts of wind power, (2006).
- [11] Trade Wind: Integrating Wind, (2009).
- [12] 荻本和彦, 大関崇, 植田譲: 太陽光発電を含む長期電力需給計画, 電学論 B, Vol. 130, No. 6, pp. 575-583 (2010).
- [13] J. Wang, A. Botterud and G. Conzelmann: Impact of Wind Power Forecasting on Unit Commitment and Dispatch, 8th Int. Wind Integration Workshop, Bremen, Germany, Oct. 14 (2009).
- [14] A.J. Wood and B.F. Wollenberg: Power Generation, Operation, and Control, John Wiley & Sons, Inc (1996).
- [15] N.P. Padhy: Unit Commitment—A Bibliographical Survey, IEEE Transaction on power systems, Vol. 19, No. 2, pp. 1196-1205 (2004).
- [16] S. Salam: Unit Commitment Solution methods, World Academy of Science, Engineering and Technology 35, pp. 320-325 (2007).