

物理的制約を考慮した電力市場メカニズム

小出 明*

1. はじめに

エネルギー・環境問題への対策として太陽光発電や風力発電などの再生可能エネルギー（以下再エネ）に期待が高まっており、電力系統への導入が拡大している。とくに、2050年カーボンニュートラル実現という目標も掲げられており、第6次エネルギー基本計画では2030年に電力の発電量のうち36~38%を再エネで賄うという野心的な数値目標[1]も設定されており、将来的な主力電源化が期待されている。ただし、太陽光発電や風力発電などの再エネの出力は気象条件に依存するため、完全に予測することは困難であり、需給運用への影響が懸念されている。また、再エネの多くは系統連系インバータ（おもに電流制御型インバータ）を通じて系統連系するため、非同期電源が増加し系統慣性の低下などの課題もある。このような状況下においても、供給信頼度（停電の少なさ）を維持しつつ、安定的な電力供給を行うためには、「電源や流通設備量が需要に対して適切であること」に加え、「系統内に故障が発生した場合でも、故障を波及させずに、もとの状況に復帰できる」ことが必要である[2]。通常、電力系統の供給信頼性について議論する場合、前者は「アデカシー」、後者については「セキュリティ」とよばれている[2]。電力系統は火力、原子力や水力発電などの電力を発生させる設備、工場や住宅など電力を消費する需要家、発電所で発生した電力を需要家まで届けるための経路となる送電線や配電線、変圧器などの変電設備などさまざまな流通設備から構成されている。そのため、安定的に電力供給を行うためには、これらの設備の特性や電気的な特徴からなる物理的な制約を考慮しつつ系統運用する必要がある。

電力系統工学では、電力系統における工学的諸課題を解決するうえで満足すべき膨大かつ多様な条件を考慮し、運用コストや送電損失などの評価を最大あるいは最小とすることが求められている。ある問題設定に対して最適な電力の潮流状態を実現する、電力系統のセッティングを計算すること全般を最適潮流計算（OPF: Optimal Power Flow calculation）[3]とよんでおり、電力会社の中央給電指令所システム（中給システム）にもセキュリティ制約を考慮するためにOPFが導入されている例が

ある。また、次期中給システム開発における検討状況[5]にもOPFが考慮されている。

一方、電力自由化の流れから、わが国においてもさまざまな種類の電力市場が創設され、電力需給に占めるシェアは年々増加している。たとえば、わが国の電力市場の中で最も約定電力量(kWh)が多いJEPXの前日スポット市場では、2022年度末では全体の電力販売量のうち約40%[4]を占めており、今後も増加し続けると考えられる。このような状況から、電力の安定的な供給を続けていくためには、冒頭で述べた「アデカシー」や「セキュリティ」の維持を電力市場メカニズムで実現する必要がある。先行事例として、米国のPJM (Pennsylvania-New Jersey-Maryland)では、同時市場(kWhや Δ kWを同時に取引する市場)が開設されており、電力市場メカニズムにおいてセキュリティ制約を維持する仕組みが構築されている。具体的には、同時市場において、前日市場での入札情報に基づいてセキュリティ(供給信頼度)制約付発電機起動停止計画(SCUC: Security Constrained Unit Commitment)を行い発電機追加起動の判断や、リアルタイム市場においてセキュリティ制約付経済負荷配分制御(SCED: Security Constrained Economic Dispatch)における発電計画および給電指令の際にOPFが使われている[6]。また、わが国の今後の電力市場設計における議論[7]においてもPJMのように同時市場の創設が検討されており、約定ロジックの設計や実現性・妥当性の検証において、SCUCやSCEDについても言及されている。ゆえに、今後のわが国の市場設計においてもセキュリティ制約を考慮した電力市場メカニズムをどのように構築していくかが重要な課題になると考えられる。

以上のような背景から、本稿ではセキュリティ制約(系統運用上の物理的な制約)に着目した電力市場メカニズムの構築に関して解説を行う。そのために、電力系統の運用上のセキュリティ制約について整理し、OPFについて解説する。その後、OPFを用いた物理的な制約を考慮した電力市場メカニズムの構築例として文献[8]を解説する。なお、本稿では、市場運用者の立場から見た市場モデルの構築を対象としているため、「アデカシー」の確保や入札制度、需要家や発電事業者の入札行動についての検討は対象外とする。

* 富山大学

Key Words: OPF, security constraint, electricity market.

2. 電力系統運用上の制約について

電力の品質として文献 [9] ではいくつか挙げられているが、電力品質の重要な要素として供給信頼度、電圧、周波数があげられる。安定的な電力供給を維持するためには、再エネ大量導入時においてもこれらの要素の品質を維持する必要がある。そのためには、セキュリティ制約を考慮する必要がある。具体的には、電力系統を構成する要素からなる制約、大規模なネットワークであることに起因する制約となる。前者の制約は、発電機や送電線、変電所などの設備自体の物理的な制約である。後者は系統の安定性に関する制約となる。主要な制約は以下の四つ [2] があげられる。なお、これらの制約が悪化した場合の影響の詳細については文献 [2] を参照されたい。

- 熱容量：電力系統を構成する機器の熱的耐力の制約
- 周波数：周波数を安定的に維持するための制約
- 電圧：電圧の安定性を維持するための制約
- 安定性：同期運転の安定性を維持するための制約

※同期運転とは同期発電機および同期電動機が同じ速度で回転している状態を示す。

なお、周波数制約については、近年は再エネ増加に伴う系統慣性の低下が懸念されており、周波数変化率 RoCoF (Rate of Change of Frequency) 悪化対策について議論 [10] が行われている。電圧安定性制約については、PVカーブ (有効電力-電圧特性) が評価に用いられることが多い。安定性制約 (同期安定性) については、微小なじょう乱に対する安定性である定態安定性 (もしくは定態安定度)、落雷などの大きなじょう乱に対する安定性である過渡安定性 (過渡安定度) の二つがある。前者の評価には固有値解析が、後者の評価には臨界事故除去時間が用いられることが多い。

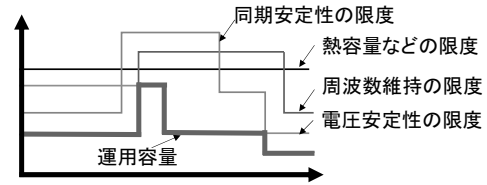
なお、送配電事業者間を結ぶ地域間連系線では、第 1 表に従い評価を行い、最も厳しい潮流状態を第 1 図のように運用容量としている。

第 1 表 地域間連系線の運用容量の考え方 (出典：参考文献 [11] をもとに筆者が作成)

制約要因	想定故障	判定方法
熱容量等	N-1 故障	架空送電線は CIGRE 式に基づく許容電流以内 直流設備、ケーブル、その他直列機器は設計上の許容値以内
同期安定性	通常想定し得る範囲	発電機内部位相角の動揺が収束する潮流
電圧安定性	電力設備の故障	基幹系統の母線電圧が維持できる潮流
周波数維持	連系線ルート断 (系統分離)	周波数が一定範囲内に維持できる潮流

3. 最適潮流計算について

系統運用上の制約を考慮した最適潮流計算手法は 1960 年代から長く研究 [12] されており、これまでにさまざまな目的関数の最小化 (もしくは最大化) を実現するための手法が提案されている。たとえば、熱容量制約についてはほかの三つの制約を対象とする場合にも多く考慮されているが、文献 [13] では蓄電池を活用した送電



第 1 図 地域間線連系線の運用容量 (文献 [11] をもとに筆者が作成)

線混雑管理コスト最小化を目的とした手法を提案している。また、周波数制約については、さらに、電圧安定度制約については、文献 [14] では、PVカーブを計算する代わりに、電圧安定性指標とよばれる VIPI (Voltage Instability Proximity Index) を用いた最適潮流計算による電圧安定度・緊急予防制御手法が提案されている。最後に同期安定性や周波数制約については、潮流状況以外にも系統構成などさまざまな要素に影響を受ける。とくに過渡安定度制約については、じょう乱の大きさ、時間経過、系統構成・潮流状況、発電機のインピーダンスや慣性などの機器定数、発電機自動電圧調整器、调速機などの自動制御装置、そのほか多くの要因によって左右される [15]。TSCOPF (Transient Stability Constrained OPF) としてさまざまな手法が提案 [16,17] されている。しかし、この制約は OPF に直接組み込むことは困難であるため、与えられた発電機起動状態に対して潮流状態を決定する際に OPF を使い、過渡安定度制約の評価については、別途時間領域シミュレーションなどを行い、発電機の脱調リスクがある場合は、発電機起動停止計画を修正するなどの OPF を補助的に用いるアプローチが有効と考えられる。以上のようにセキュリティ制約を考慮するための手法として OPF が提案されている。本章では、文献 [3] を参考に最適潮流計算の定式化や考慮すべき制約条件を解説する。

3.1 最適潮流計算の定式化について

最適潮流計算は数理計画問題として以下の (1)~(4) 式のような形で定式化することができる。解法については、逐次二次計画法や内点法、逐次線形計画法、縮約勾配法などが代表的である。

$$\text{Objective function} \\ \text{Minimize (or Maximize)} \quad f(x, u, z) \quad (1)$$

$$\text{Subject to} \\ g_1(x, u, z) = 0 \quad : \text{power flow equations} \quad (2) \\ g_2(x, u, z) = 0 \quad : \text{equality constraints} \quad (3) \\ h(x, u, z) \leq 0 \quad : \text{inequality constraints} \quad (4)$$

まず、 f は目的関数であり、第 2 表に示した運用コストや送電損失など最小化したい関数を設定する。なお、社会便益 (もしくは社会余利) の最大化は、市場参加する発電事業者および需要家の利益の総和の最大化に相当するため、市場モデルの構築に利用されることが多い。

第 2 表 目的関数の例 (出典: 参考文献 [3] をもとに筆者が作成)

燃料費コスト: 発電機の経済負荷配分
有効電力損失: ネットワークの有効利用
各種の設備量: 調相設備などの最適計画
各種の制御量: 最小の制御量で運用制約を満足する方策
社会便益 (Social Benefit): 「生産者余剰」+「消費者余剰」の最大化
無効電力損失: 間接的に電圧安定性を考慮
送電可能電力: ATC (Available Transfer Capability) TTC (Total Transfer Capability) の評価

つぎに, g_1, g_2, h は制約条件に相当し, それぞれ潮流方程式, そのほかの等式制約, 不等式制約を示している. 前章で示したセキュリティ制約は, 最適潮流計算の目的に応じて制約条件として組み込まれている.

最後に変数 x, y, z については, x は電力系統を構成する各母線の電圧の大きさや位相角からなる電圧ベクトルの集合, u は発電機の有効電力出力や端子電圧, 調相設備の無効電力出力, 負荷の有効・無効電力 (負荷遮断) など制御・調整が可能な量 (制御量) を, z は発電機であれば, 無効電力出力など制御変数の設定により従属的に決まる変数である.

3.2 最適潮流計算における制約条件について

3.2.1 潮流制約 (潮流方程式) の分類

潮流方程式については, 電力系統の解析で多く利用されている潮流計算とは異なっている. これは通常の潮流計算では指定値として与えられるべき, 発電機の有効電力や電圧の大きさも変数としているためである. なお, 潮流方程式については, 発電機の経済負荷配分のみを考える場合は, (5) 式のように需給バランスのみ (送電損失を無視した場合) となる. また, 電圧の変動は考えず, 各母線の位相と送電線を通る有効電力潮流のみに着目する場合は, 直流法最適潮流計算 (DC 潮流 OPF) とよばれ, (6) 式のように定式化される. DC 潮流 OPF は解きやすさから, オンラインの高速計算や各種の系統条件に対する多数の最適潮流の概略計算に用いられることが多い.

$$\sum_{i=1}^{N_G} P_{Gi} = P_D \quad (5)$$

$$P_{Gi} - P_{Li} = \sum_{\substack{j=1 \\ j \neq i}}^N \frac{\theta_i - \theta_j}{x_{ij}}, \quad (i=1, 2, 3, \dots, N) \quad (6)$$

ただし,

P_{Gi} : ノード i の発電機有効電力出力, P_D : 電力需要
 P_{Li} : ノード i の電力需要, θ_i : ノード i の位相
 x_{ik} : ノード ik 間のリアクタンス

一方, 電圧や無効電力を考慮する場合は (7), (8) 式のように潮流方程式を定式化する交流法最適潮流計算 (AC

潮流 OPF) となる. AC 潮流 OPF は想定故障等に対するセキュリティ制約, 安定度制約などの条件を考慮したより精緻な OPF や電圧・無効電力に関する問題の計算に多く用いられている.

$$P_{Gi} - P_{Li} = V_i \sum_{j=1}^N V_j \{G_{ij} \cos(\theta_i - \theta_j) + B_{ij} \sin(\theta_i - \theta_j)\} \quad (7)$$

$$Q_{Gi} - Q_{Li} = V_i \sum_{j=1}^N V_j \{G_{ij} \sin(\theta_i - \theta_j) - B_{ij} \cos(\theta_i - \theta_j)\} \quad (8)$$

ただし,

Q_{Gi} : ノード i の発電機無効電力出力
 Q_{Li} : ノード i の無効電力需要
 G_{ij}, B_{ij} : アドミタンス行列の i 行 j 列の要素 ($G_{ij} + jB_{ij}$)

3.2.2 その他の等式制約, 不等式制約について

潮流方程式以外の等式制約については, 変圧器などの機器の特性, SVC (Static Var Compensator) など制御装置のロジックを表す方程式, 電圧安定度や過渡安定度の制約などが満たすべき一連の方程式である. また, 不等式制約については, 電圧の大きさや送電線潮流制約, すべての制御変数の上下限値を指定する制約である.

4. 物理的制約を考慮した電力市場メカニズムの構築について

冒頭で述べたように, OPF は電力市場において系統制約を考慮した潮流状態を決定する際に用いられている. そのため, 再エネ大量導入に伴う課題の解消を目的関数や制約条件を追加した OPF を電力市場モデルに組み込むことで, 電力市場メカニズムによって課題解消や系統運用への貢献を期待することができる.

たとえば, 文献 [17] では, 電力潮流の混雑解消のために用いられる地点別限界価格 LMP (Locational Marginal Price) に対して, 負荷側の無効電力需要を加えた 2D-LMP を活用した電力市場モデルを提案している. また, 文献 [18] では, N-1 事故時における過負荷 (熱容量制約違反状態) を長時間, 短時間, 即時に対処すべき場合の三つに分けて考慮した Risk Based LMP を提案している. また, 文献 [19] では, 調整力市場に対して最適化計算で計算される LMP を導入し, 調整力の周期を考慮して価格シグナルを更新することで, 送電線混雑と再エネ出力変動による需給インバランスの双方を解消する市場モデルを構築している. また, 文献 [8] では, N-1 事故時における熱容量制約と再エネの出力変動を確率的な視点で考慮した前日スポット市場モデルを構築している.

本章では, 物理的な制約を考慮した市場メカニズムの構築例としてこの文献 [8] について解説を行う.

4.1 N-1 基準違反リスクを考慮した電力市場メカニズムの概要

前日市場では、実需給の1日前に約定されるため、再生可能エネルギー出力を完全に予測することは困難である。また、発電機の脱落や系統事故などの不確実な要素がある。このような状況下で、セキュリティ制約を完全に維持する、すなわちゼロリスクとするためには、再生可能出力変動やN-1事故の双方を考慮した厳しい制約を守る必要がある。一方で、再生可能出力が定格出力になることはまれであり、稀頻度のために厳しい制約下で運用するには、コストの増加や多額の投資が必要になる。そのため、稀頻度の状態に対しては制約違反を許容するなど一定のリスクを許容した前日市場モデルの構築が有効と考えられる。文献[8]では、再生可能エネルギーの出力変動の確率密度分布が既知とし、N-1基準違反リスクとして、送電線混雑の発生リスクを確率的に考慮した前日市場モデルの構築を提案している。具体的にはN-1事故(送電線1回線開放事故)時に、送電線混雑が発生するリスクが事前に設定した許容値以内になるように、送電線混雑発生リスクが上昇する取引を抑制し、リスクが低減する取引を誘発させるような潮流制御を考慮した最適潮流計算による約定処理を提案している。構築した市場モデルでの約定処理の流れを第2図に示す。第2図に示すように同モデルでは、最適潮流計算による約定処理、N-1事故時におけるN-1基準違反確率(送電線混雑発生リスク)の評価、リスクを制御するための潮流制御(確率的な視点からの潮流制約の更新)から構成されている。それぞれの詳細については次節以降に詳細を示す。

4.2 最適潮流計算に基づく約定処理の定式化

発電事業者や需要家は、限界費用および限界効用に基づき売り入札をすると想定した。また、再生可能エネルギーの入札については、全量が約定されるように限界費用(同文献では0と想定)、入札量は予測値と想定した。以上の入札に基づき市場運用者の(7)式に示すように、

社会余剰最大化をするよう約定処理を行う。なお、同モデルでは、後述する潮流制御によってN-1事故時の送電線混雑発生リスクを制御する。このとき、リスク増加に寄与する取引を、経済性を考慮して制限するために、提案モデルではノードルプライスやLMPの算出と同様に(7)~(10)式で構成されたDC法最適潮流計算問題として約定処理を定式化している。

なお、潮流制約の初期値は送電線1回線開放時の熱容量値とし、次節で示す潮流制御では(9)式の潮流制約を、N-1事故時の送電線混雑発生リスクが目標値以下になるよう更新することで市場メカニズムによる潮流制御およびリスク制御を行う。

(目的関数)

$$SW = \sum_{i=1}^{N_G} (-C_i(q_{gi})) + \sum_{j=1}^{N_D} (U_j(q_{dj})) \rightarrow \max \quad (9)$$

(制約条件)

・需給制約

$$\sum_{k=1}^{N_{VRE}} E[P_{VRE,k}] + \sum_{i=1}^{N_G} q_{gi} - \sum_{j=1}^{N_D} q_{dj} = 0 \quad (10)$$

・線路潮流制約

$$-P_{f_{\max,l}} \leq P_{fl} = \frac{\theta_k - \theta_m}{x_{km}} \leq P_{f_{\max,l}} \quad (11)$$

・入札量上下制限制約

$$\begin{aligned} q_{gi,\min} &\leq q_{gi} \leq q_{gi,\max} \\ q_{dj,\min} &\leq q_{dj} \leq q_{dj,\max} \end{aligned} \quad (12)$$

ただし、

SW : 社会余剰

C_i : 発電事業者の燃料費関数

U_j : 需要家 j の効用関数

q_{gi} : 発電事業者 i の売り入札量

q_{dj} : 需要家 j の買い入札量

$E[P_{VRE,k}]$: ノード k の VRE 出力の予測値 (売り入札量)

$q_{gi,\max}, q_{gi,\min}$: 発電事業者の入札量の上下限値

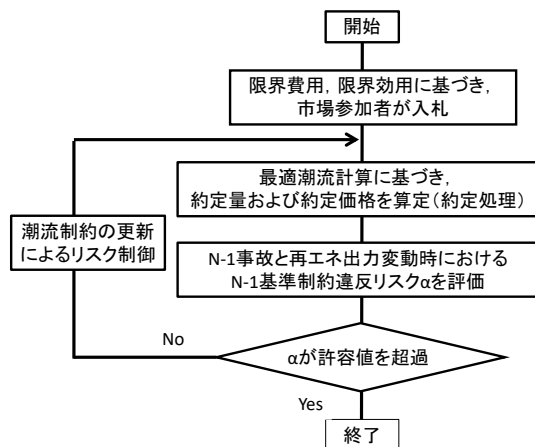
$q_{dj,\max}, q_{dj,\min}$: 需要家の入札量の上下限値

P_{fl} : 送電線 l の電力潮流量

$P_{f_{\max,l}}$: 送電線 l の電力潮流量の潮流制約

N_G, N_D : 入札する発電事業者数, 需要家数

上記の最適潮流計算を解くことで、各発電事業者や需要家の約定量は決定される。物理的な制約を考慮しない場合、一般的に売り入札曲線と買い入札曲線の交点が約定点となる。しかし、物理的な制約を考慮した場合、交点が存在せず約定価格が一意に決定できない可能性がある。そのため、構築したモデルがシングルプライスオー



第2図 市場メカニズムによる需給制御のフロー (文献[8]をもとに筆者が作成)

クシオンとなるように, (11) 式に示すように約定時の発電事業者の最大価格と需要家の最小価格の平均値を約定価格として設定している.

$$price = (\max(M_{gi}) + \min(M_{dj})) / 2 \quad (13)$$

ただし,

$price$: 約定価格

M_{gi} : 発電事業者 i の限界費用関数

M_{dj} : 需要家 j の限界効用関数

4.3 市場メカニズムを利用した送電線混雑リスク制御手法

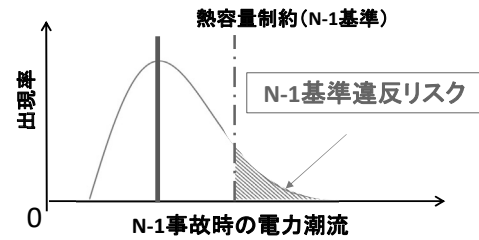
前節の最適潮流計算によって決定した約定時の潮流状態は前日市場の約定処理時のものであるため, 実需給までの間に再エネの出力変動 (予測値からの誤差) による需給インバランスや N-1 事故などの一定の不確実な要素が発生すると考えられる. このとき需給インバランスについては, 事前に確保していた調整力を活用して補償される. しかし, 再エネの出力変動や調整力の行使によって, 系統内の各送電線の電力潮流の分布も変動する. このとき, さらに N-1 事故として送電線 1 回線開放事故が発生し, 熱容量制約が半分になった場合, 送電線混雑が発生しやすくなる. 構築した市場モデルでは, 再エネ出力変動の確率密度分布が既知と想定し, 第 3 図のように N-1 事故時における電力潮流の確率密度分布を算出し, N-1 事故時の熱容量制約超過分の期待値を N-1 基準違反リスクとして定義し制御対象としている. なお, 図中の太い実線は約定時の潮流を示している. また, 再エネ出力変動の確率密度分布は, 再エネが風力発電と想定し, ワイブル分布によって風速を乱数によって生成, その後出力を算出している. また, 電力潮流の確率密度分布は直流法電力潮流計算を多数回行うモンテカルロシミュレーションによって算出している. この N-1 基準違反リスクが許容値を超えた場合, 後述する潮流制御によって送電線混雑リスク制御を実施する.

送電線混雑リスク制御では, 第 4 図のように約定時の潮流が左右にシフトすることで潮流の確率密度分布が同様にシフトすることを想定する. この想定を利用して, 送電線混雑リスクが許容値以内となる潮流シフト量 ΔPfl (N-1 事故時であれば ΔPfl^{N-1}) を算出する. この ΔPfl を用いて前節の最適潮流計算における潮流制約である (9) 式を, (12) 式に更新する. なお, 一部の送電線の潮流を制限した場合, ほかの送電線の潮流が増加し, 送電線混雑リスクが増加すると考えられる. ゆえに, リスクの増加を許容値以内に収めるために潮流制約を (13) 式のように更新する.

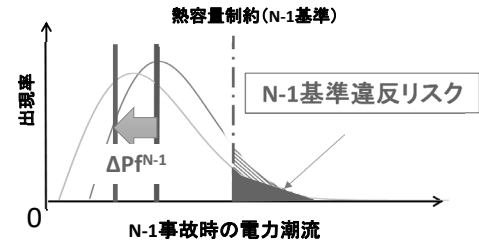
$$Pf_{max,l,new} = Pf_{max,l} - \Delta Pfl \quad (14)$$

$$Pf_{max,l,new} = Pf_{max,l} + \Delta Pfl \quad (15)$$

ただし,



第 3 図 N-1 事故時における送電線混雑リスクの評価 (文献 [8] をもとに筆者が作成)



第 4 図 潮流制御のイメージ (文献 [8] をもとに筆者が作成)

ΔPfl : 線路 l に対する潮流制御量

$Pf_{max,l,new}$: 潮流制約の更新値

以上のように確率的な視点で潮流制約を更新し, 約定処理と潮流制御を繰り返し行うことで, 市場メカニズムによって送電線混雑リスクを考慮した前日スポット市場を構築している. このような約定処理を行うことで, リスク低減に貢献する需要家や発電事業者に対して, リスク制御参加へのインセンティブとなるように市場モデルを構築している.

5. おわりに

今後は, 冒頭で述べたようにわが国でも米国 PJM のように同時市場の創設が検討されており, 国内でも同時市場を想定した研究も報告 (たとえば文献 [21] など) され始めている. 同時市場に関する検討では, セキュリティ制約付発電機起動停止計画 (SCUC) にも触れられており, OPF もセキュリティ制約を考慮した潮流状態を算出するための重要な技術となる. 本稿で解説したように OPF を用いて電力市場メカニズムの高度化を実現し, セキュリティ向上に貢献する市場参加者にインセンティブを与えることができれば, 同時市場の高度化も期待できると考えている.

一方で, セキュリティ制約のうち過渡安定度制約や RoCoF などの周波数制約のように, kWh の約定のみでは対処が困難な制約も存在する. これらの制約は, 発電機起動状態や電圧制御設備の導入状況など系統構成に影響を受ける. これらは kWh として価値が算定されるものではないため, 設備計画など別のアプローチによって必要な量を算定し, 適切なインセンティブを与える仕組みの構築が重要になると考えられる. さらに, 近年

は電圧制御型インバータである GFM インバータ (Grid Forming Inverter) も注目され、系統安定化や系統慣性の低下時の対策など研究が盛んに行われている [22]。このような新しい技術を有する発電事業者や再エネ事業者に対して、どのようなインセンティブを付与し、電力市場メカニズムに組み込んでいくかも重要な課題と考えている。その際には、構築した電力市場メカニズムにおいて費用対効果などの分析も重要になると考えている。

(2024年6月13日受付)

参考文献

- [1] 経済産業省: 第6次エネルギー基本計画の概要; <https://www.meti.go.jp/press/2021/10/20211022005/20211022005.html> (2021) (2024年6月2日閲覧)
- [2] 杉澤: 電力安定供給を支える電力流通設備計画・運用技術シンポジウム, 電力系統の特徴と制約, 令和6年電気学会全国大会, S5-2 (2024)
- [3] 関根, 横山, 安田, 林, 田辺, 岡本, 多田: 電力系統の最適潮流計算 (OPF: Optimal Power Flow), 日本電気協会 (2001)
- [4] 資源エネルギー庁: 電力・ガス小売全面自由化の進捗状況について; 第64回総合資源エネルギー調査会 電力・ガス事業分科会 電力・ガス基本政策小委員会配布資料 (2023)
- [5] 経済産業省, 送配電網協議会: 次期中給システム開発に関する検討状況; 第1回同時市場の在り方等に関する検討会, 配布資料 (2023)
- [6] 経済産業省, デロイトトーマツ: 米国・欧州における市場設計について; 第2回あるべき卸電力市場, 需給調整市場及び需給運用の実現に向けた実務検討作業部会, 参考資料 (2022)
- [7] 経済産業省: 「同時市場の在り方等に関する検討会」の進め方等について; 第1回同時市場の在り方等に関する検討会, 配布資料 (2023)
- [8] 小出, 辻, 田中, 杉本: N-1基準を考慮した電力市場メカニズムに基づく確率的需給制御手法; 電学論B, Vol. 141, No. 1, pp. 1-12 (2021)
- [9] 雪平: 電力品質とその限度値; 電気設備学会誌, Vol. 25, No. 10, pp. 767-771 (2005)
- [10] 電力広域的運営推進機関: 「再エネ主力電源化」に向けた技術的課題及びその対応策の検討について; 第55回調整力及び需給バランス評価等に関する委員会, 配布資料 3 (2020)
- [11] 電力広域的運営推進機関: 連系線の運用容量算出における検討条件について (2025~2034年度) (2024)
- [12] 竹原: 用語解説 (第42回テーマ: 最適潮流計算 (OPF)); 電学論B, Vol. 134, No. 9, p. 6 (2014)
- [13] A. D. Del Rosso and S. W. Eckroad: Energy storage for relief of transmission congestion; *IEEE Transactions on Smart Grid*, Vol. 5, No. 2, pp. 1138-1146 (2014)
- [14] 竹原, 田中, 岩本: VIPI 感度に基づく電圧安定度予防制御・緊急予防制御; 電学論B, Vol. 122, No. 4, pp. 528-535 (2002-4)
- [15] 堀内: 用語解説 (第79回テーマ: 過渡安定度); Vol. 137, No. 10, p. 6 (2017)
- [16] G. Guangchao Geng, et al.: Solution techniques for transient stability-constrained optimal power flow - Part I; *Special Issue: Interfacing Techniques for Simulation Tools in Smart Grid*, Vol. 11, Issue 12, pp. 3177-3185 (2017)
- [17] G. Guangchao Geng, et al.: Solution techniques for transient stability-constrained optimal power flow - Part II; *Special Issue: Interfacing Techniques for Simulation Tools in Smart Grid*, Vol. 11, Issue 12, pp. 3186-3193 (2017)
- [18] V. Sarkar and S. A. Khaparde: Reactive power constrained OPF scheduling with 2-D locational marginal pricing; *IEEE Transactions on Power Systems*, Vol. 28, No. 1, pp. 503-512 (2013)
- [19] Q. Wang, G. Zhang, J. D. McCalley, T. Zheng and E. Litvinov: Risk-based locational marginal pricing and congestion management; *IEEE Transactions on Power Systems*, Vol. 29, No. 5, pp. 2518-2528 (2014)
- [20] 裴, 辻, 大山, 内田: 風力発電を含む電力系統における調整力市場ベースの地点別限界価格による需給制御と混雑管理; 電学論B, Vol. 138, No. 8 (2018)
- [21] 服部, 田邊, 亀井, 益田, 河辺: 同時市場における需給計画の送電損失のために確保する予備力とセキュリティの関係評価; 電気学会電力技術/電力系統技術/半導体電力変換合同研究会, PE-24-004, PSE-24-016, SPC24-058, pp. 19-24 (2024)
- [22] NREL (National Renewable Energy Laboratory): Research Roadmap on Grid-Forming Inverters, Technical Report (2020)

著者略歴

こ 小 出 明



1988年11月生。2016年3月横浜国立大学大学院工学府物理情報工学専攻博士課程後期修了。同年4月富山大学工学部寄附講座客員助教, 2019年4月より共同研究講座客員助教, 現職に至る。最適潮流計算を活用した電力系統の需給運用や経済制度構築に関する研究に従事。電気学会, IEEE 会員。