

〈特集〉

脱炭素化に向けた電力システムの課題とシミュレーション評価技術例

渡辺 雅 浩

(株)日立製作所 研究開発グループ

(〒319-1292 日立市大みか町7-1-1 E-mail: masahiro.watanabe.ma@hitachi.com)

概 要

本稿では、脱炭素化に向けた電力システムの課題とシミュレーション技術動向およびその活用事例について紹介する。再生可能エネルギーの大量導入にともなう課題に対し、エネルギーモデルによるカーボンニュートラルを実現するための電源や需要構成の検討、再生可能エネルギーなどの電力変動に対する周波数変動の検討、系統外乱時の電力システムの安定性評価事例等について紹介する。

キーワード：電力系統、発電機起動停止計画、電力需給制御、負荷周波数制御、系統シミュレーション

原稿受付 2022.5.11

EICA: 27(1) 20-24

1. はじめに

2050年カーボンニュートラルへの移行に向けて、発電側では炭素原単位の低い発電燃料（天然ガス・新燃料）へのシフトや再生可能エネルギー（以下、再エネ）の大量導入や原子力発電の活用、需要側ではEV化の加速などの電化・電動化や水素の活用、さらにはCCUS（Carbon dioxide Capture, Utilization and Storage）やDAC（Direct Air Capture）技術の開発など、多様な施策が検討されている。電力システムにおいても、発電・送配電網を含むエネルギーインフラが安定供給を保つために、いつどのような対策を行う必要があるかを定量的に評価して適切なタイミングで技術開発や設備計画を行っていくことが重要となる。

このような電力システムの信頼性、経済性、環境性に係わる様々な現象や要因を定量的に評価するために、各種デジタルシミュレーション手法が開発され、カーボンニュートラルに向けた将来シナリオの検討評価に用いられている。これらの検討を進める上では、従来の発送電ネットワークに加えて、出力変動をともなう再生可能エネルギー発電、EV充放電や水素製造含む需要側の電力調整（デマンドレスポンス）などの影響や制御効果を評価していくことが必要となる。

本稿では、脱炭素化に向けた電力システムの課題とシミュレーション技術の動向およびその活用事例について紹介する。

2. 電力システムの課題

カーボンニュートラルに向けた電力システム検討において変動型電源である再エネ大量導入の影響把握と

対策検討が重要となる。電源構成や需要の変化に合わせて、適切な対策立案と実行も必要である。Fig. 1に再エネ導入時の電力システムの課題と対策を示す^{1,2)}。再エネの電力量比率が高まるにつれて、需給制御や蓄電システム・揚水発電の運用高度化などの技術の開発が必要となる。

このように電力システムでは再エネの出力変動を含む需給調整や系統安定性確保を秒単位の短時間から日単位から季節単位の長期にわたって実施することが重要である。これはカーボンニュートラルに至る途中経過段階においても常に必要とされる。このような電力システムの需給制御について Fig. 2に概念図を示す。時々刻々変動する需要や発電に対して、負荷周波数制

課題	Phase	再エネ電力量比	Phaseの概要	対策候補
系統運用微修正	Phase1	~5%	再エネによる系統への顕著な影響なし	リアルタイム監視制御 ・送電容量の拡大
潮流変化大	Phase2	~10%	再エネによるわずかな系統運用影響	需給運用の広域連携 ・柔軟な発電出力制御 ・系統安定化システム
柔軟な供給調整	Phase3	~20%	再エネ出力が系統運用を決定	非同期電源の連系制限 ・揚水発電の運用高度化 ・高速周波数応答 ・蓄電システム
長期エネルギー過不足	Phase4	~45%	再エネ100%タイミング発生	
季節単位の電力貯蔵	Phase5	~70%	日単位での再エネ余剰（蓄電）	・水素・大規模蓄電（数日）
	Phase6	~100%	季節単位の再エネ余剰（水素貯蔵）	・水素・新燃料長期貯蔵

Fig. 1 Key characteristics and challenges in the different phases of system integration^{1,2)}

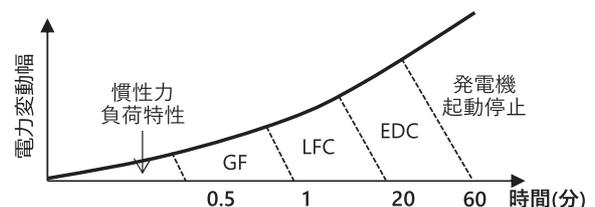


Fig. 2 Conceptual diagram of supply and demand control sharing^{3,4)}

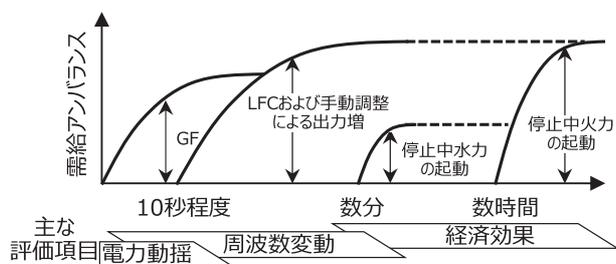


Fig. 3 Operation for supply-demand imbalance⁵⁾

御 (LFC: Load Frequency Control) や経済負荷配分制御 (EDC または ELD: Economic Load Dispatching Control) などの需給制御によって常に需要と供給 (発電) が釣り合うように発電機、蓄電、デマンドレスポンスなどの調整・制御が行われ、周波数が一定に保たれる。また、それより短い周期の変動成分は発電機のガバナフリー制御 (回転数を一定に保つように出力を変化させる制御) や負荷特性・発電機の慣性力 (自己制御性) によって吸収される^{3,4)}。逆に長期にわたるものは発電機起動停止計画問題 (UC: Unit Commitment Problem) として、需給バランスを保ちつつ例えば運転費が最小になるような発電機の起動停止パターンの決定によって運用される。需給アンバランス解消の視点で示した図を Fig. 3 に示す⁵⁾。各時間領域での評価項目は電力動揺、周波数変動、経済効果など様々であるが、いずれの時間領域でも需給アンバランスを解消するために十分な調整力が確保されていることが必要である。

次にこのような検討に用いられるシミュレーション手法やデータの事例について紹介する。

3. シミュレーション技術

3.1 エネルギーモデル⁶⁾

将来のカーボンニュートラルが可能であるか、達成実現可能なエネルギーシステム群からどのようなものを選択するかという定量的評価を進める場合に、数値シミュレーションモデルとしてエネルギーモデルが用いられている。例えば文献6ではボトムアップ型技術選択モデルが示されており、最適なエネルギーキャリアのフローや設備の投資、運用などの技術構成を決定可能としている。本モデルは Fig. 4 に示すようにエネルギーの生産 (輸入) から転換・送配・最終需要部門での消費に至るエネルギーシステム全体を対象に、対象期間のシステム総コストを最小にする最適化モデルとして構成されている。このモデルを最適化手法によって解くことで解が得られる。文献6では発電部門の時間解像度を10分として日間の負荷変動やPV・風力発電の出力変動、各種発電技術の運転性能、電力貯蔵技術の運用を明示的に考慮して、15年間の総コ



Fig. 4 Reference energy system^{2,6)}

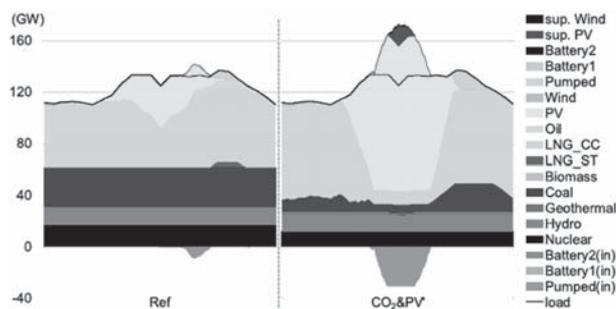


Fig. 5 Example of daily power generation profile⁶⁾

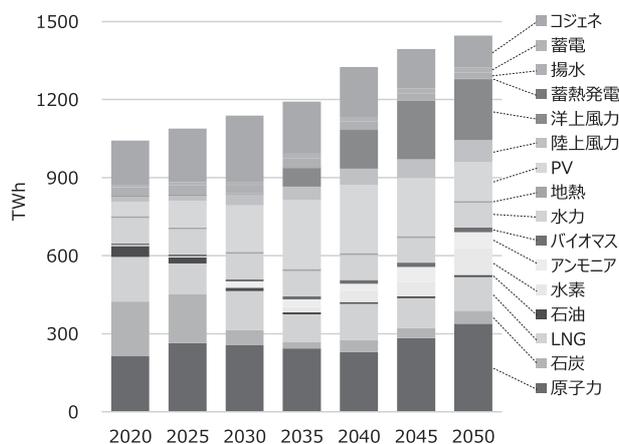


Fig. 6 Example of simulation results using reference energy system²⁾

ストを最小化するエネルギー技術選択結果が計算されている。また Fig. 5 には、計算結果からある日の発電分担の日変化例を示している。左の“Ref”はCO₂制約を設定しないケース、右の“CO₂&PV”はCO₂排出量の制約を設定しかつPV建設コストが低下する条件のケースである。右のケースではPVが大量に導入されることで昼間に余剰電力が発生し揚水発電あるいはPVの出力制限 (sup.PV) により需給均衡が図られていることがわかる。

文献2では本モデルを利用して2050年のカーボンニュートラルを実現するエネルギーシステム構成例が検討されている。Fig. 6 に計算結果イメージの一例を示す。国内で2030年にCO₂排出量46%減と2050年

カーボンニュートラルを実現するための電源別エネルギー供給量と容量を、燃料価格や発電コストなどをある条件に仮定した下での計算結果が示されている。

このようにエネルギーモデルのシミュレーションによって10分～年間の需給計画や運用状況と、経済性やCO₂排出量などの指標の評価が可能となる。

3.2 電力需給・周波数シミュレーション⁷⁻¹⁰⁾

2章で示したように、短時間の需給アンバランスに対しては周波数変動を規定範囲内に抑えることが必要となる。周波数変動を定量的に把握するためのシミュレーションツール、モデルとして、電気学会電力需給解析モデル標準化調査委員会によって通称AGC30モデルと呼ばれる標準モデルが開発され、2016年に公開された。

この標準モデルを利用した周波数計算モデルの一例をFig. 7に示す。文献10では、合計3400 MW規模のPVを含む発電機、LFCやELDの制御機構、連系線潮流の計算モデルなどを含むシステムシミュレーションモデルが構成され、LFC調整力の確保手法改善による発電コスト削減効果評価が示されている。ベース条件での周波数変動のシミュレーション例をFig. 8に示す。

このように、将来の電力システムで想定されるシステム構成を反映したモデルデータや需給制御機能を設定することで、再エネ増や発電状態変化に対するシステムの周波数変動への影響を定量的に把握することが可能となる。また蓄電池などの新たな制御方式の効果や必要となる容量なども評価可能となる。

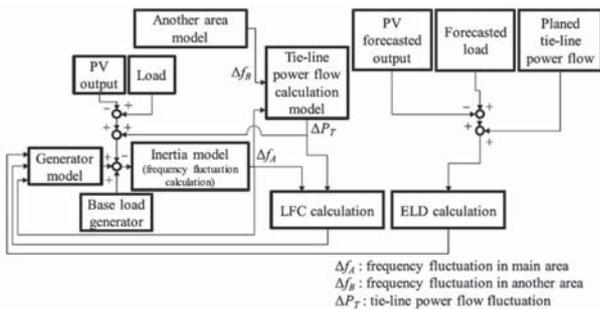


Fig. 7 Frequency calculating model¹⁰⁾

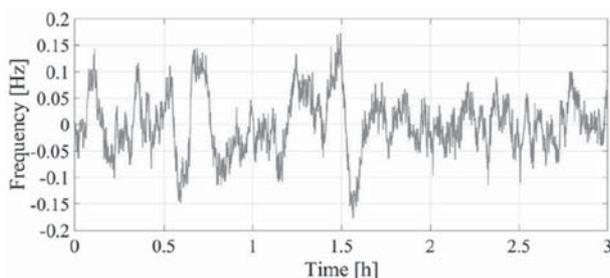


Fig. 8 Example of frequency fluctuation by conventional method¹⁰⁾

3.3 安定性シミュレーション

風力発電など需要地から離れた場所に電源が設置される場合、電力消費地までの長距離かつ大電力の送電が必要となる。この場合、電力システムの安定性が維持されるか評価を行うことが重要となる。具体的には、落雷時の短時間電圧低下や送電線開放を伴う系統故障時や、発電設備の脱落時などの外乱時に、数秒間の間に周波数低下や発電機の動揺・脱調によって系統が大規模停電に至らないか、評価する必要がある。

電力システムの安定性シミュレーション技術は古くから開発、改良が続けられてきた¹¹⁾。また電気学会では安定性シミュレーションに用いるための、東日本・西日本系統をイメージした標準モデルを開発し提供している^{12,13)}。これらの標準モデルを用いて様々な系統安定化技術の開発が進められている¹⁴⁻¹⁶⁾。標準モデルから東日本系統がイメージされたEAST30機系統モデルをFig. 9に示す¹⁶⁾。

カーボンニュートラルに向けて電力システムの信頼性を維持していくためには、多重故障時の影響評価や、広域電力融通時の安定性維持が重要となる。例えば文献17では①大規模電源サイトの同時脱落②4回線(2ルート)の送電線の同時停止、が発生した場合に同期安定性シミュレーションによる影響(発電停止規模、ブラックアウト発生可能性有無)が評価されている。また文献18では、公開情報に基づく広域システムモデルを作成し再エネが偏在して大量導入された場合の系統安定性および対策の効果評価が示されている。

以下、具体的な広域系統安定性評価のイメージを示す¹⁹⁾。Fig. 10に例題としたシステムモデルを示す。Area

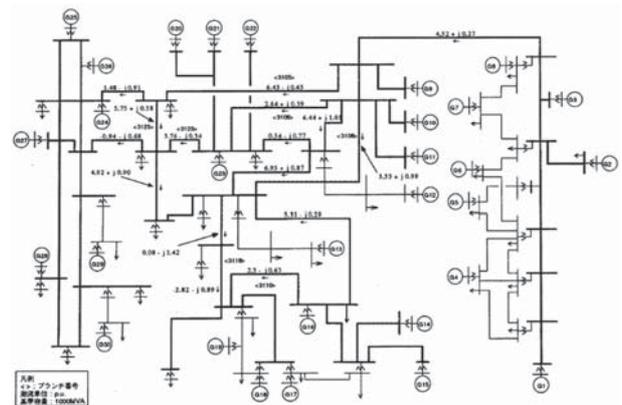


Fig. 9 IEEJ EAST30-machine system model¹⁶⁾

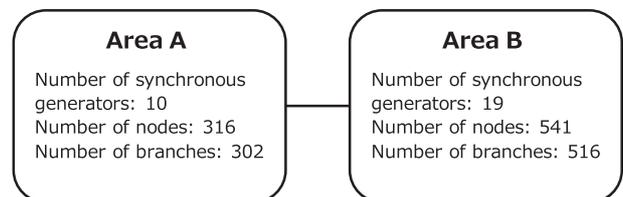


Fig. 10 System model condition for evaluation¹⁹⁾

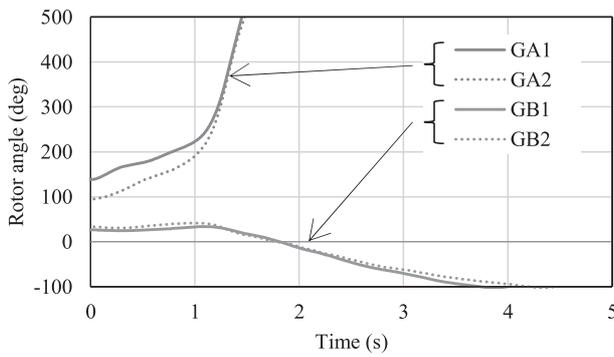


Fig. 11 Rotor angle of the generators (unstable case)¹⁹⁾

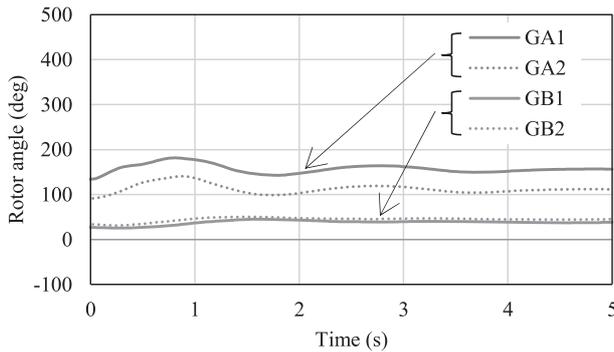


Fig. 12 Rotor angle of the generators (stable case)¹⁹⁾

A が東日本システムの北部を、Area B が南部を想定したモデルとしている。なお、ここではシステムモデルは Web で公開されている系統情報や電気学会などの標準的な発電機モデルなどから構成されている。再エネが大量に導入されたことにもない電力システムの慣性や同期安定性が低下した条件において、基幹送電線で落雷等による地絡故障が発生した場合のシミュレーション結果を Fig. 11, Fig. 12 に示す。おもな検討条件は次の通り。

- ・総需要：57.6 GW，再エネ容量：55 GW
- ・想定故障シーケンス：
 - 0.00 秒：故障発生（1 回線三相地絡）
 - 0.07 秒：故障除去および開放
 - 0.17 秒：電源制限（安定化対策実施の場合）

Fig. 11 は系統安定性が保たれない故障ケースの発電機内部相差角を示す。故障発生から約 1 秒後（時刻 1 秒付近）で GA1, 2 の内部相差角が大きくなっており発電機が脱調し系統が不安定となっていることがわかる。Fig. 12 は故障後に電源制限の安定化対策を行った場合の発電機内部相差角を示す。故障後若干の動揺は発生するものの、脱調する発電機は無く安定性が保たれていることがわかる。

今後カーボンニュートラルに向けて、再エネの偏在化が進み、またインバータ電源比率が増加するにしたがって、電力システムの同期・周波数安定性が低下していくことが想定される。シミュレーションによる電力システムの安定性の評価や、効率的な安定化対策の

検討を逐次実施していくことが重要と考えられる。

3. おわりに

本稿では、脱炭素化に向けた電力システムの課題とシミュレーション技術の活用事例について紹介した。今後脱炭素化にむけた様々な施策検討に合わせてシミュレーション手法やモデルの改良を進めていくことが重要と考えられる。また、電力システム以外の熱、ガス、モビリティ、水などのエネルギーに関わる各種ネットワークを統合したシミュレーションに発展させることで、より効率的な社会インフラの実現に貢献できるものとする。

参考文献

- 1) IEA: Status of Power System Transformation 2019
- 2) 日立東大ラボ:「Society 5.0 を支えるエネルギーシステムの実現に向けて」(第 4 版), 日立東大ラボ・産学協創フォーラム (2022)
<http://www.ht-lab.ducr.u-tokyo.ac.jp/2021/12/01/news032/> (閲覧日 2021 年 5 月 9 日)
- 3) 一般送配電事業者 (10 社): GF および LFC 運用の現状について, 第 19 回需給調整市場検討小委員会料 2-2 (2020)
https://www.occto.or.jp/iinkai/chouseiryoku/jukyuchousei/2020/files/jukyu_shijyo_19_02_02.pdf (閲覧日 2021 年 5 月 9 日)
- 4) 天野博之:用語解説 (第 30 回テーマ:負荷周波数制御 (LFC)), 電気学会論文誌 B, Vol. 133, No. 8 (2013)
- 5) 電力広域的運営推進機関:調整力に関する検討について, 第 4 回調整力及び需給バランス評価等に関する委員会 資料 2 (2016)
https://www.occto.or.jp/iinkai/chouseiryoku/2016/files/choousei_jukyu_04_02.pdf (閲覧日 2021 年 5 月 9 日)
- 6) 川上恭章, 小宮山涼一, 藤井康正:高時間解像度の発電部門を持つエネルギーシステム技術選択モデルによる CO₂削減シナリオの分析, 電気学会論文誌 B, Vol. 138, No. 5, pp. 382-391 (2018)
- 7) 電力需給解析モデル標準化調査専門委員会:電力需給・周波数シミュレーションの標準解析モデル, 電気学会技術報告第 1386 号 (2016)
- 8) 斎藤浩海:電力需給・周波数シミュレーションの標準解析モデル, MATLAB EXPO 2016 (2016)
- 9) 加藤丈佳:「電力需給解析標準モデル (IEEJ AGC30) を使ったシミュレーション技術」特集号に寄せて, 電気学会論文誌 B, Vol. 140, No. 5, p. 350 (2020)
- 10) 辻井佑樹, 古川俊行, 渡辺雅浩, 山根憲一郎:PV 出力のリアルタイムデータに応じた LFC 調整力の確保手法, 電気学会論文誌 B, Vol. 140, No. 7, pp. 595-603 (2020)
- 11) 谷口治人, 田中和幸, 内田直之:電力系統解析システムの開発, 電気学会論文誌 B, Vol. 128, No. 2, pp. 377-380 (2008)
- 12) 電気学会:電力系統の標準モデル,
https://www.iee.jp/pes/ele_systems/base_model/ (閲覧日 2021 年 5 月 9 日)
- 13) 電力系統モデル標準化調査専門委員会:電力系統の標準モデル, 電気学会技術報告, No. 754 (1999)
- 14) 永田真幸:安定度を考慮した ATC 評価手法の開発 —— 想

- 定事故スクリーニングの基本論理——，電力中央研究所報告，T03016（2004）
- 15) 首藤隆徳，永田真幸，吉村健司，杉内栄夫，竹下充浩，米井健二：過渡安定度と電圧安定性の双方を考慮した制御手法の検討，電気学会論文誌 B，Vol.133，No.10，pp.740-745（2013）
- 16) 滝本昭，内田直之：オンライン定態安定度監視のための事故選択スクリーニング手法の開発，電気学会論文誌 B，Vol.122，No.7，pp.815-820（2002）
- 17) 電力広域的運営推進機関：災害に強い電力供給体制の確認について，調整力及び需給バランス評価等に関する委員会資料4（2019）
- 18) 日立東大ラボ：「Society 5.0を支えるエネルギーシステムの実現に向けて」（第2版），日立東大ラボ・産学協創フォーラム（2019）
<http://www.ht-lab.ducr.u-tokyo.ac.jp/2019/04/17/news11/>
（閲覧日2021年5月9日）
- 19) 加藤大地，木下喜仁，恒富邦彦，渡辺雅浩：再生可能エネルギー連系時の年間の経済・環境性評価を可能とするシミュレータの開発，電気学会電力技術 電力系統技術合同研究会資料，PE-19-172，PSE-19-182（2019）