

気象条件で発電出力が変動する再生可能エネルギーの大量導入を可能にする水力発電技術

Technologies for Hydroelectric Power Generation Facilitating Increased Introduction of Variable Renewable Energy

森 淳二 MORI Junji 濱口 晃二 HAMAGUCHI Koji 飯田 昭司 IIDA Shoji

我が国では、固定価格買取（FIT）制度が2012年に開始されて以降、再生可能エネルギー（以下、再エネと略記）の導入量が増加してきたが、2050年までのカーボンニュートラル達成に向けて、更なる加速が予想される。その中で、水力発電は、最も利用されている再エネであり、太陽光発電（PV）や風力発電など気象条件で発電出力が変動する再エネが大量に導入された場合の調整力としても期待されている。

東芝エネルギーシステムズ（株）は、これまで多くの水力発電設備を開発し、国内外に納入してきた経験と技術を生かし、既存設備の効率的な活用に向けた水車や発電機の性能・機能向上とともに、気象予測などのAI技術や再エネの変動する電力とのバランス制御技術などと組み合わせることで、電力システムの安定化に更に貢献できるシステムの開発に取り組んでいる。

The introduction of renewable energy has been progressing in Japan under the feed-in tariff (FIT) scheme launched in 2012. Moreover, the movement toward the realization of carbon neutrality by 2050 is expected to further accelerate the generation of electricity by renewable energy sources. In this context, attention is being increasingly focused on hydroelectric power generation, which not only remains the major source of renewable energy in Japan but also makes it possible to rapidly adjust to output power fluctuations resulting from the widespread adoption of renewable energy sources such as photovoltaic (PV) and wind systems.

Toshiba Energy Systems & Solutions Corporation is making continuous efforts to develop technologies for hydraulic turbines and generators to enhance their functionality and performance in order to improve the operational efficiency of existing systems, based on its experience and technological know-how cultivated through the development of a large number of hydroelectric power generation facilities. We are now working toward the development of systems that can significantly contribute to the stabilization of power grids by integrating artificial intelligence (AI) technologies including weather forecasting and energy balancing technologies to suppress power fluctuations.

1. まえがき

水力発電は、最も古く、また最も活用されている再エネである^{(1), (2)}。

国内では、2012年に施行された再エネのFIT制度により、PVや風力発電など、気象条件で発電出力が変動する再エネ（以下、変動再エネと略記）が急増したが、水力発電でも、既存設備の一式更新を中心に、多数の建設が推進されている。

東芝エネルギーシステムズ（株）は、120年以上前から水力発電の機器製造に携わっている⁽³⁾、我が国で現存する最も歴史のある水力発電機器メーカーであり、現在も水力発電機器やシステムの開発に取り組んでいる。ここでは、水力発電について、再エネによる発電システムとしての価値や、変動再エネの大量導入に対応する柔軟性を高める技術について述べる。

2. 再エネとしての水力発電

国内の一般水力発電の設備容量は約22 GWと、全発電設備の8.3 %を占める⁽⁴⁾。未開発の包蔵水力は約19 GWと言われているが、FIT制度が施行されて以降、2017年3月末時点での新規導入量は24万kWにすぎない⁽⁵⁾。一方、水力発電の総発電量に占める割合は2018年時点で7.7 %と、2011年度時点の7.8 %と同等であるものの、PVの6.0 %より多く⁽⁶⁾、最も利用されている再エネ設備である。

カーボンニュートラルを達成する一つの施策として、再エネである水力発電での発生電力量（kWh）を増やすことは、有効な対策である。エネルギー長期計画では、2030年の再エネ比率は22 ~ 24 %で、水力発電は8.8 ~ 9.2 %とされている。これを達成するためには、あと90万 ~ 170万kWの設備が必要とされており⁽⁶⁾、設備容量を増やす制度が望まれる。

一方、既存の設備を効率的に活用することで発生電力量を増やすことも重要と考えており、その視点での技術開発を

進めている。

2.1 水車、発電機の効率向上

水車や発電機の効率向上は、発電設備としての価値を高める重要な技術であり、当社は、継続して開発を進めている。ここでは、その手法について述べる。

- (1) 水車効率向上技術 水車の設計には、流れ解析とともに、最適化技術を駆使して性能向上を図っている。

流れ解析は、計算機の処理能力の向上に伴って高度化してきているが、モデル化を含めた解析手法や解析条件の設定が重要で、当社は、常に模型試験との比較評価を行うことで、精度向上に努めている。

最適化技術は、効率やキャビテーションなどの設計での要求事項を目的関数 y とし、これを多くの設計パラメーター($x_1, x_2, x_3, \dots$)で $y=f(x_1, x_2, x_3, \dots)$ のように数式化して最適解を導き出す手法である。

水車設計に用いられる代表的な最適化技術として、当社は、以下のような手法を目的に合わせて適切に選択し、性能向上を図っている。

- (a) 決定論的に局所探索する手法
 - ・実験計画法 (Design of Experiments : DOE)
- (b) 確率論的に広域探索する手法
 - ・遺伝的アルゴリズム (Genetic Algorithm : GA)
 - ・粒子群最適化 (Particle Swarm Optimization : PSO)

- (2) 発電機効率向上技術 発電機設計にも最適化技術を応用して、効率向上を図っている。図1に示すように、電気設計と機械設計を連成させた自動解析ツール

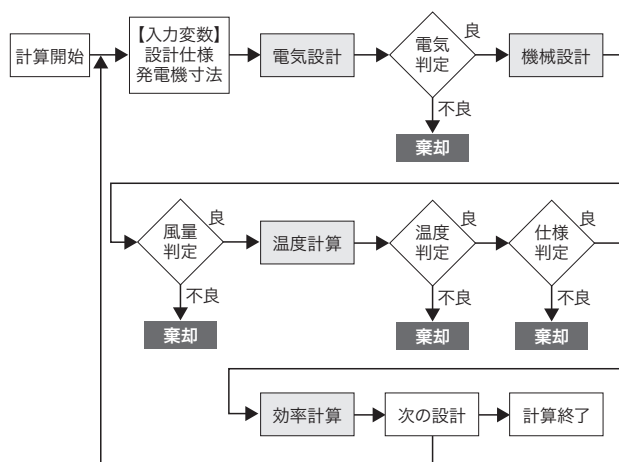


図1. 発電機自動解析ツールによる最適設計フロー

電気設計と機械設計を連成させ、目的関数に対する最適化を図る自動解析ツールを構築することで、最適な設計を選択可能としている。

Flow of design optimization using generator automatic analysis tool

を構築しており、目的関数に対する多数の設計案を計算させ、最適な設計を選択可能としている⁽⁷⁾。

2.2 発電所の運用、保守の効率化

最新のデジタル技術、IoT (Internet of Things) 技術を活用し、運用を効率化して発生電力量を増やすこと、若しくは稼働率を上げることで、逸水を減らすことが可能となる。ここでは、これらに寄与する技術について述べる。

- (1) 気象予測と最適化技術活用による水系制御 洪水や融雪などによって発電せずに下流へ放流される水は無効放流水と言われるが、これを減らすことやダム水位の変動を許容することで、発生電力量を増やすことが可能となる。

当社は、気象予測技術を活用した降雨量及び降雪量予測によりダムへの流入量を計算し、最適化技術(この特集のp.40-43参照)を活用して、無効放流水を減らすとともに水系全体として発生電力量を最大化するシステムの開発に取り組んでいる。

これは、ダム運用にも関わるため、レジリエンス(危機耐性力)との兼ね合いへの配慮が必要であるが、数%の発生電力量増加のポテンシャルを秘めている。

- (2) 運転データ活用による稼働率向上 物理的に一方向にしか送信できない伝送装置やセキュアなOPS (Operator Station) 端末により、セキュリティを確保しつつ、制御装置が保有する運転データを遠隔で監視できるシステムを開発した⁽⁸⁾。

我が国の水力発電所は、無人で遠方から制御しているところが多く、従来は、発電所に赴かないと機器の情報を確認できなかったが、このシステムでは、図2に示すとおり、運転中のデータを制御所や保守センターでも確認可能となる。

メーターの自動読み取りによって、巡視点検時に確認している項目を自動収集することや、データ分析にAI技術を活用することで、機器の状態把握や故障の予兆診断も可能となる。これらの技術を、保守支援に寄与させるとともに、計画外停止による稼働率低下の未然防止にも役立てていく。

3. 変動再生エネを支える水力発電

変動再生エネは、気象条件で発電出力が変動することや設備利用率が低いことから、大量導入のためには、電力システムの柔軟性を高める必要がある。

また、我が国は、変動再生エネの中でもPVが多く、風力発電が多いヨーロッパに比べて、同期化力・慣性力・無効電力供給能力の低下や、系統安定度・周波数維持能力・電圧維持能力の低下などが、より心配されている⁽⁹⁾。

その際に、水力発電機が持つ同期化力・慣性力・無効

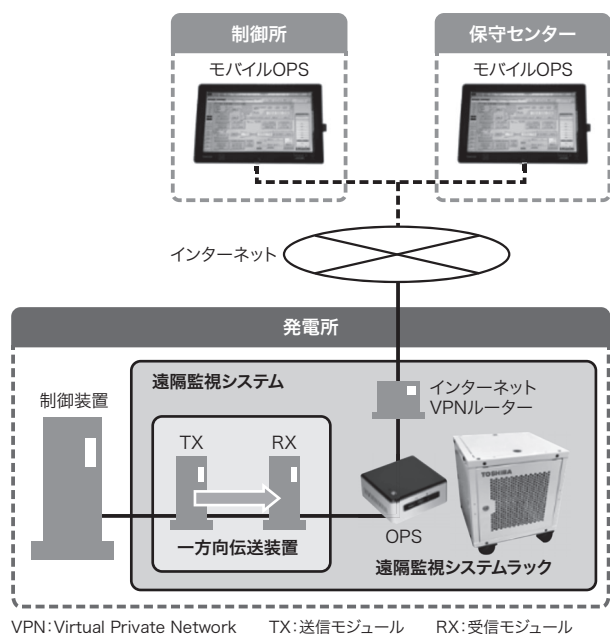


図2. 水力発電所遠隔監視システムの構成例

運転中のデータを遠隔地にある制御所や保守センターでも確認でき、機器の状態把握や故障の予兆診断などが可能となる。

Example of configuration of remote monitoring system for hydroelectric power plants

電力供給能力そのものに加え、ダム式水力や揚水発電の有効電力調整能力や、風力発電・PVと水力発電を組み合わせたバランシング技術により、系統の柔軟性を高める技術が不可欠になると考えられる。

3.1 調整力としての水力発電

現在、一般の水力発電所も卸電力市場で取り引きされ、発生電力量が重視されている。しかし、変動再エネが大量に導入されてくると、調整力が期待されてくると考えられる。三次調整力の市場は、2021年度から開設されるが、より短時間の二次調整力や一次調整力は、2021年度中に制度設計を完了させ、2024年度から開設される計画となっている^[10]。

制度が整い、短時間の調整力の必要性が増してくると、これまで一定出力で運用されていた一般の水力発電所でも、起動停止や部分負荷運転での運用が増えることが想定される。そこで、柔軟性を高める技術開発を進めている。

- (1) 運転範囲の拡大 水車は、設計点から外れた部分負荷運転では、水車効率の低下とともにキャビテーションや水圧脈動などの不安定現象が発生する。これらを解消するため、部分負荷運転でも圧力分布が流れ方向やスパン方向に大きな歪み（ひずみ）を持たないような翼型とする必要がある。当社は、図3に示すよう

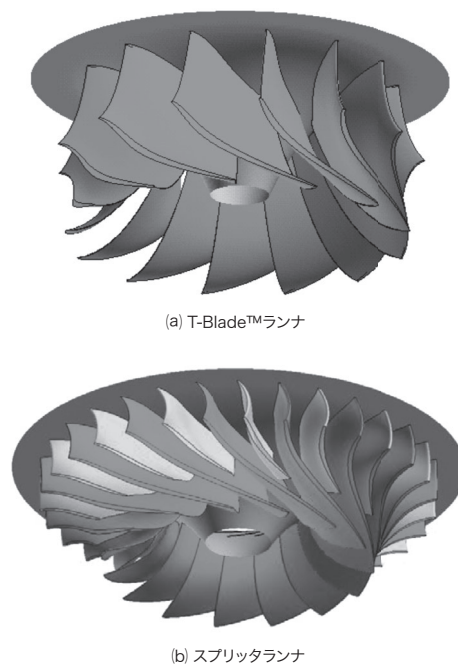


図3. T-Blade™ランナとスプリッターランナ

設計点から外れた部分負荷運転で、圧力分布に歪みを持たないような翼型のランナを開発・適用することで、運転範囲を拡大している。

T-Blade™ and splitter runners

な、T-Blade™ランナやスプリッターランナを開発し、適用している^{[3], [11]}。今後も、更なる運転範囲の拡大を目指していく。

- (2) 多頻度・高速起動／停止に即した水車・発電機

- (a) ランナの変動応力対策 起動停止回数の増加や起動時間の短縮は、水車に大きなストレスを蓄積し、損傷に発展するおそれが高くなる。そこで、起動時のランナに発生する過渡的な応力を解析する手法を確立し、多頻度・高速起動／停止を行うランナの最適設計を可能とした。

- (b) 発電機固定子コイル絶縁の熱劣化対策 発電機固定子コイルは、通電によって銅損が発生して発熱する。コイルの銅素線と絶縁層は熱膨張率が異なるため、起動停止に伴う熱変化が剥離を引き起こし、劣化の要因となる。このため、IEEE (Institute of Electrical and Electronics Engineers) 規格に準拠した熱サイクル試験 (Thermal Cycle Test) (図4) や課電劣化試験 (Voltage Endurance Test) が実施できる設備を整え、検証できるようにしている^[12]。

3.2 揚水発電システム

我が国の揚水発電システム（以下、揚水機と呼ぶ）の設備容量は、約27.5 GW^[4]と一般水力よりも多く、最も設備



図4. 回転子コイルの熱サイクル試験

回転子コイルの熱サイクル試験を実施できる設備を整備し、熱劣化などの検証ができるようにしている。

Stator bar undergoing thermal cycle test

表1. 定速揚水機と可変速揚水機の調整力比較

Comparison of power balancing capability of constant-speed and adjustable-speed pumped-storage systems

項 目	定速 揚水機	可変速揚水機
発電運転時の出力調整	可	可
発電運転時の出力調整幅	小	大 回転速度を変えることで、最低出力を低減可能
揚水運転時の入力調整	不可	大 回転速度を変えることで実現
急峻（きゅうしゅん）な 入出力調整	不可	大 回転速度を変えることで、慣性エネルギーを利用

容量の多い蓄電システムであるが、総発電量に占める割合は1.1%⁽⁴⁾と極少で、十分に活用されているとは言い難い。

東芝グループは、火力発電の発電計画に揚水機を組み込み、揚水機を有効活用することで、火力発電の運用を効率化できることを確認した（この特集のp.39-42参照）。

また、表1のとおり、固定速の揚水機（以下、定速揚水機と略記）に比べて可変速揚水機の方が柔軟性に富むシステムであり、電力システムの安定化に寄与できる。

当社は、1990年に世界で初めて可変速揚水機を実用化し、2014年には世界最大容量機を運転開始させ⁽¹⁾ており、今後も適用拡大に向けて開発を進めていく。

3.3 水力発電を活用したバランシング

2022年度から、FIT制度に加えて市場連動型のFIP

（Feed-in Premium）制度が導入されるとともに、アグリゲーションビジネスの活性化が進められようとしている⁽³⁾。

揚水式やダム式の水力発電は、調整能力が高く、変動再エネとの親和性が高いと言われており、海外では、浮上PVとダム式水力発電や、風力発電と水力発電など、いわゆるハイブリッド発電と呼ばれるシステムが適用され始めている。当社は、PV、風力発電、バランシング制御の技術も保有しており、水力発電を活用したハイブリッド発電や、バランシング制御を活用したアグリゲーションビジネスについても検討を進めている。

4. あとがき

水力発電は、古くから利用されている発電方式であるが、再エネの一つであり、また変動再エネの導入量の増加時に欠かせない調整力や系統安定化に寄与できることから、今後、より一層重要視されると考えられる。当社は、水力発電に求められる役割の変化を捉えて、運用の柔軟性を更に高める技術開発を進めるとともに、東芝グループの強みを生かし、気象予測などのAI技術や、変動再エネとのバランシング制御技術などを適切に組み合わせ、より使い勝手が良く、より電力システムの安定化に貢献できるシステム開発を進めていく。

文 献

- (1) International Hydropower Association(IHA). The world's water battery: Pumped hydropower storage and the clean energy transition. IHA, 2018, 15p. <<https://www.hydropower.org/publications/the-world-e2-80-99s-water-battery-pumped-hydropower-storage-and-the-clean-energy-transition>>, (accessed 2021-01-21).
- (2) 環境エネルギー政策研究所 (ISEP). 自然エネルギー白書2018/2019 サマリー版. ISEP, 2019, 24p. <<https://www.isep.or.jp/archives/library/category/japan-renewables-status-report>>, (参照 2021-01-21).
- (3) 森 淳二, ほか. 水力発電機器製造120年の歴史と今後の展望. 東芝レビュー, 2014, 69, 2, p.25-28.
- (4) 資源エネルギー庁. “2020年度 表一覧”. 統計表一覧. <https://www.enecho.meti.go.jp/statistics/electric_power/ep002/results.html>, (参照 2021-01-21).
- (5) 資源エネルギー庁. “固定価格買取制度 情報公表用ウェブサイト”. なっとく! 再生可能エネルギー. <https://www.enecho.meti.go.jp/category/saving_and_new/saiene/statistics/index.html>, (参照 2021-01-21).
- (6) 資源エネルギー庁. “資料1 国内外の再生可能エネルギーの現状と今年度の調達価格等算定委員会の論点案”. 第61回調達価格等算定委員会. オンライン開催, 2020-09, 資源エネルギー庁. 2020, 56p. <https://www.meti.go.jp/shingikai/santei/pdf/061_01_00.pdf>, (参照 2021-01-21).
- (7) 廣瀬孝明, ほか. 水車発電機の高効率化を実現する最新技術. 東芝レビュー, 2019, 74, 5, p.59-62. <https://www.global.toshiba/content/dam/toshiba/migration/corp/techReviewAssets/tech-review/2019/05/74_05pdf/f04.pdf>, (参照 2021-03-25).

- (8) 林 祐介, ほか, 火力発電プラントの運用高度化とセキュリティ強化に対応した監視制御システム TOSMAP-DS™/LX, 東芝レビュー, 2019, 74, 3, p.30-34. <https://www.global.toshiba/content/dam/toshiba/migration/corp/techReviewAssets/tech/review/2019/03/74_03pdf/a08.pdf>, (参照 2021-03-25).
- (9) 調整力及び需給バランス評価等に関する委員会 事務局, (資料3)「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, Web開催, 2020-10, 資源エネルギー庁, 2020, 54p. <https://www.occto.or.jp/iinkai/chouseiryoku/2020/files/chousei_55_03r.pdf>, (参照 2021-01-21).
- (10) 資源エネルギー庁, (資料4-1) 需給調整市場について, 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 第43回制度検討作業部会, オンライン開催, 2020-10, 資源エネルギー庁, 2020, 10p. <https://www.meti.go.jp/shingikai/enecho/denryoku_gas/denryoku_gas/seido_kento/pdf/043_04_01.pdf>, (参照 2021-01-21).
- (11) 戸田一典他, 森 淳二, 水力発電をめぐる市場動向と東芝の取組み, 東芝レビュー, 2015, 70, 1, 2015, p.2-6.
- (12) 武田 克, 北米における既設水力発電所の大規模改修への取組み, 東芝レビュー, 2015, 70, 1, p.16-19.
- (13) 資源エネルギー庁, 資料1 FIP制度の詳細設計とアグリゲーションビジネスの更なる活性化, 総合エネルギー調査会省エネルギー・新エネルギー分科会/電力・ガス事業分科会 再生可能エネルギー大量導入・次世代電力ネットワーク小委員会(第19回)基本政策分科会再生可能エネルギー主力電源化制度改革小委員会(第7回)合同会議, オンライン開催, 2020-08, 資源エネルギー庁, 2020, 49p. <https://www.meti.go.jp/shingikai/enecho/denryoku_gas/saisei_kano/pdf/019_01_00.pdf>, (参照 2021-01-21).



森 淳二 MORI Junji
東芝エネルギーシステムズ(株)
パワーシステム事業部
電気学会会員
Toshiba Energy Systems & Solutions Corp.



濱口 晃二 HAMAGUCHI Koji
東芝エネルギーシステムズ(株)
京浜事業所 設計第二部
ターボ機械協会会員
Toshiba Energy Systems & Solutions Corp.



飯田 昭司 IIDA Shoji
東芝エネルギーシステムズ(株)
府中工場 発電システム制御部
Toshiba Energy Systems & Solutions Corp.