

水力発電システムにおける最新技術

Latest Technologies for Hydroelectric Power Systems

日向 剛志 佐藤 夕介

■ HYUGA Takeshi

■ SATO Yusuke

再生可能な自然エネルギーを利用する発電方式の中で、水力発電は安定した出力を得ることができ、わが国における事業用発電システムとして約120年の歴史がある。

国内の大規模な水力発電所は、その主な役割を昼間のピーク電力対応に移してきているが、近年、風力・太陽光発電など気象による出力変動が大きい再生可能エネルギーの導入拡大に対応するため、その高速な出力調整能力を活用した電力系統安定化の役割も期待されてきている。また、再生可能エネルギー固定価格買取制度 (FIT) により中小水力発電の新規開発も増加してきており、世界的には、発展途上国での新設需要や、先進国での高性能機器への更新需要が拡大している。

東芝はこれらのニーズに対応するため、水力発電システムについて様々な技術開発を進めている。

About 120 years have passed since Japan's first hydroelectric power station started operation, and hydroelectric power generation still remains the major source of renewable energy in the country's total electric power output. In recent years, expectations have been rising for an expanded role for hydroelectric power generation due to its high responsiveness in maintaining stable power supply by compensating for power fluctuations resulting from the use of renewable energy sources such as wind and photovoltaic (PV) systems that are affected by weather conditions, as well as its ability to support peak electricity demand during the daytime. New development projects for small and medium-sized hydroelectric power plants have increased with the introduction of the feed-in tariff (FIT) system in the Japanese market, and demand has been growing both for new construction in developing markets and for high-performance equipment to renew aging systems in developed markets.

In response to this situation, Toshiba is promoting the development of technologies for equipment in hydroelectric power systems.

1 まえがき

東芝は、わが国初の事業用発電所である蹴上発電所（京都市）への60 kW 交流発電機の納入（1894年）以来、世界初^(注1)のポンプ水車向けスプリッターランナの納入⁽¹⁾や、世界初^(注2)の可変速揚水発電システムの納入⁽²⁾など、水力発電分野での技術開発を主導する役割を担ってきた。

近年では、再生可能な自然エネルギーの有効活用のため、水車や発電機の性能開発や、FITによる中小水力発電の増加に対応した要素技術開発、自然エネルギー発電の大規模導入のための可変速揚水発電システム開発、改修・更新時の機器性能の向上開発などに注力している。

ここでは、当社の水力発電システムにおける、水車、発電機、及び可変速揚水発電システムの最新技術の一端を述べる。

2 水車技術

2.1 高性能化技術

高性能化技術の一環として、当社は解析技術の高度化を

図っており、様々なアルゴリズムを取り入れた設計・解析技術の実用化に取り組んでいる。

一例として、流れ解析と実験計画法 (DOE: Design of Experiment) 及び多目的遺伝的アルゴリズム (MOGA: Multi-Objective Genetic Algorithm) を組み合わせた、水車性能の最適化手法の適用が挙げられる⁽³⁾⁻⁽⁵⁾。

DOEは、発電所固有の仕様に対して最適化を図るもので、設計パラメータの目的関数に対する感度を反映した伝達関数を求めて最適解を得るものである。MOGAは、設計段階での基本的な設計パラメータの最適化を図るもので、設計パラメータをランダムに作成し、従来の経験や手法だけによらない新たな形状を発生させて最適解を得るものである。

水車全体の一体解析を実施することで解析精度は向上するが、性能の最適化にこれを適用すると多大な解析時間を要してしまう。そこで、一体解析と部分解析を適切に組み合わせることで、解析時間の短縮と精度の向上を両立させている。例えば、**図1**に示すように、一体解析でランナの入口境界条件を求め、ランナの最適化にはランナと吸出し管を解析領域とする手法をとっている。

高性能化技術は、新規建設の水車だけでなく、既設水車のランナ更新にも適用している。既設発電所のフランス水車

(注1) 2003年2月時点、当社調べ。

(注2) 1990年12月時点、当社調べ。

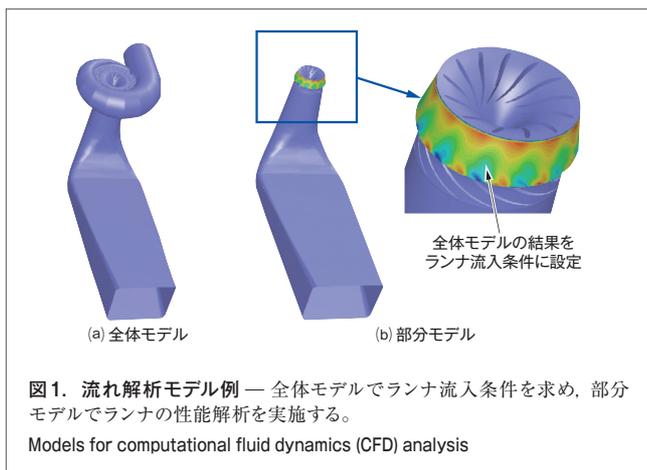


図1. 流れ解析モデル例 — 全体モデルでランナ流入条件を求め、部分モデルでランナの性能解析を実施する。

Models for computational fluid dynamics (CFD) analysis

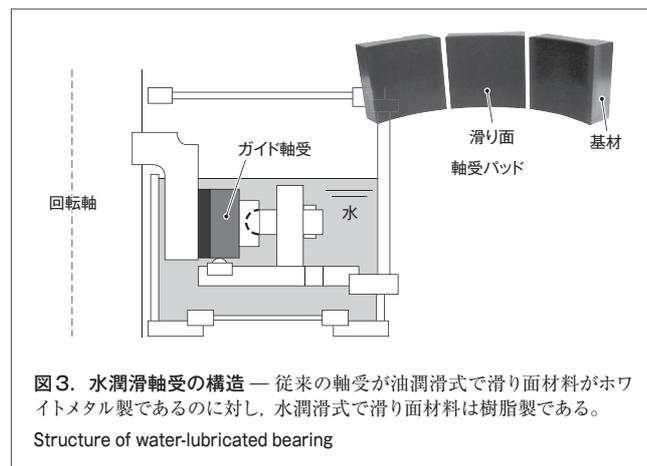


図3. 水潤滑軸受の構造 — 従来の軸受が油潤滑式で滑り面材料がホワイトメタル製であるのに対し、水潤滑式で滑り面材料は樹脂製である。

Structure of water-lubricated bearing

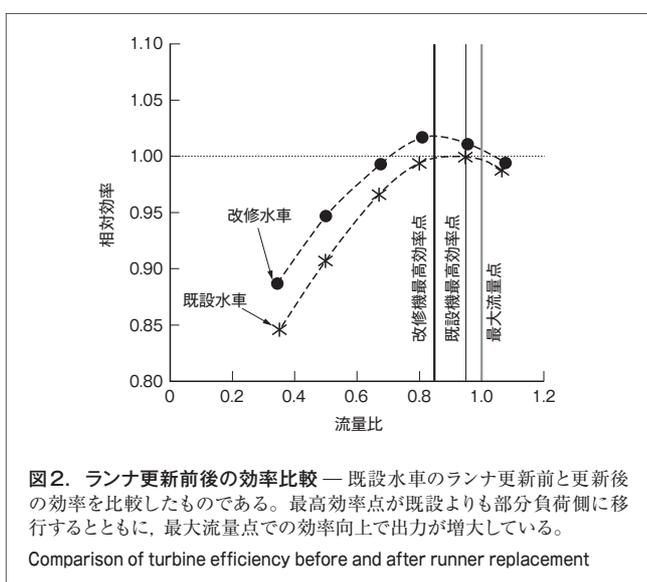


図2. ランナ更新前後の効率比較 — 既設水車のランナ更新前と更新後の効率を比較したものである。最高効率点が既設よりも部分負荷側に移行するとともに、最大流量点での効率向上で出力が増大している。

Comparison of turbine efficiency before and after runner replacement

ランナを更新した事例における更新前後の効率を図2に示す。この例では、ランナとガイドベーンの更新により、最高効率点の流量を95%から85%へと移行させながら、最大流量点での出力も増大させ、部分負荷効率の向上と出力の増大という相反する特性の改善を実現している。

2.2 油レス化技術

油流出のおそれを低減し、環境保全に寄与する油レス化の代表的な技術として、ガイドベーンや入口弁操作の電動サーボモータの適用があり多数の実績があるが、更に、従来は油潤滑であった水車軸受についても、水潤滑に変更することで油レス化を実現している。カプラン水車に採用している従来の水潤滑軸受は、円筒型のため、振動やミスアライメントによる片当たりの懸念や土砂による摩耗への対応が必要であった。

今回開発した水潤滑軸受^{(6),(7)}の構造を図3に示す。この軸受はセグメントタイプで、潤滑水に水道水又はイオン交換水を用いた水自蔵式である。また、しゅう動面には充填材入り四フッ化エチレン樹脂 (PTFE) を採用している。実機を模擬

した軸受試験装置を用いて、軸受特性や耐久性を評価し、全ての運転条件において良好な潤滑状態が保たれていることを確認している。

定常運転時の適用範囲は、面圧が2 MPa以下、しゅう動速度が5 ~ 20 m/sであり、ポンプ水車と横軸機を除くほとんどの立軸水車に適用が可能である。既にペルトン水車やフランシス水車に採用し、運転中である。

2.3 水車構造

2.3.1 スプリッターランナ

長翼と短翼を交互に配したフランシス水車ランナであり、従来のランナと比べて、部分負荷運転での性能が向上するとともに、水圧脈動やキャビテーション^(注3)に対しても優れた性能を備えている。

当社は、ポンプ水車向けのスプリッターランナを開発し、世界で初めて実機に適用した実績を持つ。また、スプリッターランナは、発電専用機においても150 mクラス以上の高落差機に有効であり、国内外の水車に採用されている。

2.3.2 リングゲート⁽⁸⁾

入口弁の代わりに円筒型のリングを水車のステーベーンとガイドベーンの間を設置し、このリングを上下させて通水と封水を行う構造の水車が適用されることがある。大口径管路にも適用可能なことや、設置スペースが不要で土木を含めたコストが削減できる利点がある。

リングゲートを複数のサーボモータで上下させるときの同期制御方法として、従来は各サーボモータの動きを機械的に連結させて同期確認を行っていたが、当社は、各サーボモータのストロークをフィードバックして制御する電気油圧制御方式を開発した。

3 発電機技術

3.1 通風冷却方式

水車発電機や発電電動機の冷却は、図4に示す回転子の回転によるファン効果を利用したラジアル通風方式が主流に

(注3) 水流中の低圧部が飽和蒸気圧以下になると気泡が発生する現象。

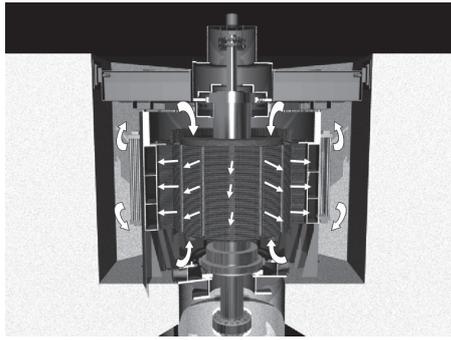


図4. ラジアル通風方式 — 回転子のファン効果を活用したラジアル通風方式は、軸方向に均等な風量分布を実現でき、現在、主流となっている。
Radial ventilation cooling system

なっており、電動ファンなどを省略することができるため、発電機の構造の簡素化や保守の省力化が図れる。更に、固定子鉄心やコイルを冷却するために必要な風量を、固定子鉄心の軸方向に均等に分布させることができるという特長もある。

発電機が高速回転機になると回転子のスポーク径が小さくなるため、高速大容量機においては、ラジアル通風方式では必要な冷却風量の確保が難しいと言われてきた。この通風方式の適用を拡大するために、縮小模型装置による開発検証を実施し、コイルエンドカバーなどの整流要素形状を工夫し、通風損失の低減を図ることで、現在では定格出力475 MVA、回転速度 500 min^{-1} の高速大容量発電電動機にも適用している。

中小容量の水車発電機には、空気冷却器を省略した出口管通風方式が用いられることもある。寒冷地向けでは、冬期に発電所内にこの排熱を循環させて有効活用し、環境負荷の低減に貢献しているケースもある。

3.2 樹脂軸受

当社は、軸受の滑り面にPTFE系材料を用いた樹脂スラスト軸受⁽⁹⁾の適用を1994年から開始した。この樹脂軸受の適用により、オイルリフタなどの補機類の省略に加え、保守の簡素化や省力化、信頼性の向上、及び長寿命化などの点で優れた運転評価を得ている。また顧客の要望により、既存の他社製発電機に当社の樹脂軸受を適用する事例も増えている。

近年では、海外でも樹脂スラスト軸受の適用を要求されるケースが増えており、当社の差別化技術として高い評価を得ている。中小容量の水車発電機だけでなく、200 MW級の大容量水車発電機や、300 MW級の大容量発電電動機(図5)にも適用が拡大している。

樹脂スラスト軸受の適用限界平均面圧は、ホワイトメタルを用いた従来のスラスト軸受の5 MPaよりも高面圧化しており、軸受寸法のコンパクト化により損失を低減できる。更に、高面圧化を目指した開発検証により平均面圧7 MPaを超える見通しも得ており、スラスト軸受をよりコンパクトにできることが

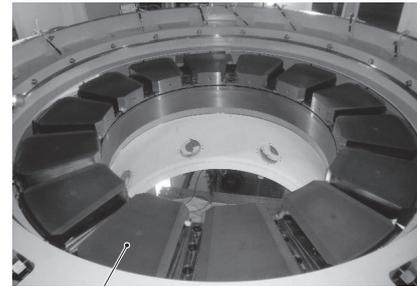


図5. 300 MW級の発電電動機に適用した樹脂スラスト軸受 — 樹脂スラスト軸受の適用範囲が拡大し、300 MW級の大容量発電電動機にも採用されている。

Polytetrafluoroethylene (PTFE) thrust bearing for 300 MW-class generator-motor

ら、軸受の損失をいっそう低減できるようになる。

また、中小容量の発電所では、所内設備を簡素化するために給水レス化が指向されており、樹脂軸受の適用による損失低減効果と合わせて、空冷軸受の適用範囲が拡大している。

スラスト軸受に加えて、横軸発電機用のジャーナル軸受や、立軸発電機のガイド軸受にも樹脂軸受の適用が拡大している。

これらの軸受は、樹脂スラスト軸受と同様に、高面圧化によるコンパクト化と構造の簡素化が図れ、軸受損失の低減により空冷軸受の適用範囲が拡大できるとともに、摩耗が少ないため長寿命で、潤滑油の汚れも少なく、保守の簡素化や省力化を実現している。

4 可変速揚水発電システム

4.1 可変速発電電動機

当社の可変速発電電動機は、東京電力(株)矢木沢発電所への世界初の納入以降、5プラントで営業運転中であり、現在製作中の、可変速発電電動機として世界最大出力^(注4)となる東京電力(株)葛野川発電所の475 MVA、 500 min^{-1} 機、及び北海道電力(株)京極発電所の230 MVA、 500 min^{-1} 機を合わせ、世界最多^(注5)の実績を持っている。

可変速発電電動機の回転子巻線は三相分布巻線構成となり、回転子コイルの端部は運転中の遠心力の作用を受けるため、特殊な支持構造が必要になる。当社は、そのために独自のUボルト支持方式⁽⁹⁾を開発して適用し、高い通風冷却性能と保守性を実現している(図6)。

4.2 交流励磁装置

4.2.1 システム構成 交流励磁装置は、回転子の三相巻線に三相交流を供給し、発電電動機の電圧制御、有効電力、及び無効電力の制御をベクトル制御により高速に行う装

(注4)、(注5) 2013年5月現在、当社調べ。



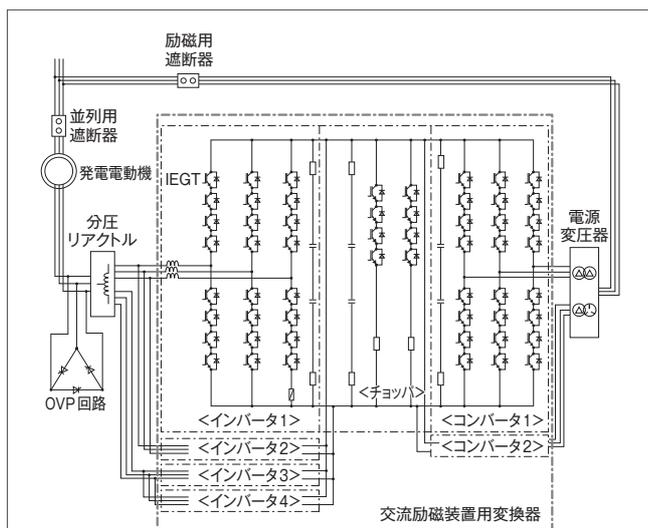
図6. 475 MVA-500 min⁻¹ 発電電動機の回転子 — 円筒構造を持ち、上下コイルエンド部は東芝独自のUボルト方式で支持し、冷却性能と保守性に優れている。

Rotor assembly of 475 MVA-500 min⁻¹ generator-motor with U-bolt coil-end support system developed by Toshiba

置である。

可変速揚水発電システム向け変換器の利用率を高めながら高調波を低減する目的で、図7に示すように三相インバータ2組を分圧リアクトルを用いて結合し、3相3レベルのインバータと等価な出力を得る、当社独自の構成を前述の両発電所のシステムに採用している。

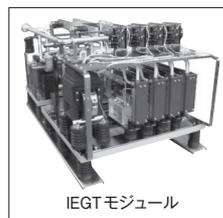
4.2.2 変換器 両発電所では、低損失で高耐圧の半導体素子である当社製 IEGT (Injection Enhanced Gate Transistor)^⑩を交流励磁装置用変換器に初めて採用した(図8)。変換器の損失低減とコンパクト化に貢献している。



OVP : Over Voltage Protection

図7. 交流励磁装置の主回路構成 — 東芝独自の分圧リアクトル方式の回路構成である。

Configuration of AC exciter using center-tap reactor



IEGT モジュール



インバータ盤

図8. IEGTモジュールとインバータ — IEGTモジュールを採用し、変換器のコンパクト化に貢献している。

Inverter cubicle equipped with injection enhanced gate transistor (IEGT) modules

5 あとがき

今後とも、高効率で信頼性が高く、環境負荷の少ない発電機器の技術開発を通して、再生可能エネルギーの導入促進という近年の社会的要望に応える技術開発を継続していく。

文 献

- (1) 戸田一典 他. 世界最大容量・高落差の揚水発電用ポンプ水車 — 東京電力(株)神流川発電所納入. 東芝レビュー. 61, 5, 2006, p.58-61.
- (2) 中村泰造 他. 可変速揚水発電システムの実用化(東京電力・矢木沢発電所). 電気学会論文誌B. 111, 6, 1991, p.583-586.
- (3) 日向剛志 他. 最適化技術と高度CFD技術の適用による水車の高性能化. 東芝レビュー. 65, 6, 2010, p.7-10.
- (4) 黒澤貞勇 他. 水車全体流路解析による性能検証模型試験の代替技術. 東芝レビュー. 67, 7, 2012, p.19-22.
- (5) Enomoto, Y. et al. "Design Optimization of a High Specific Speed Francis Turbine Runner". The 26th IAHR Symposium on Hydraulic Machinery and Systems. Beijing, China, 2012-08, IAHR. Paper Number IAHRXXVI-304.
- (6) タントロン 他. 水力発電用車の水潤滑樹脂軸受. 東芝レビュー. 67, 4, 2012, p.48-51.
- (7) 中川斉年 他. 水潤滑セグメント型ラジアル軸受. ターボ機械. 40, 8, 2012, p.1-7.
- (8) 中川斉年 他. 世界市場での大容量・長寿命化のニーズに応える水車適用技術. 東芝レビュー. 65, 6, 2010, p.11-14.
- (9) 久保 徹 他. 環境負荷の低減に貢献する高性能・高機能水車発電機技術. 東芝レビュー. 65, 6, 2010, p.15-18.
- (10) 西谷和展 他. 高耐圧大電流 IEGT. 東芝レビュー. 63, 11, 2008, p.9-14.



日向 剛志 HYUGA Takeshi

電力システム社 火力・水力事業部 水力プラント技術部主務。水車改修のエンジニアリング業務に従事。ターボ機械協会会員。

Thermal & Hydro Power Systems & Services Div.



佐藤 夕介 SATO Yusuke

電力システム社 火力・水力事業部 水力プラント技術部。水力発電機器のエンジニアリング業務に従事。

Thermal & Hydro Power Systems & Services Div.