

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

Startup of High-Head Pump-Turbine with World's Largest Capacity at Kannagawa Power Station

戸田 一典

■ TODA Kazunori

黒川 敏史

■ KUROKAWA Toshifumi

近内 忠

■ KONNAI Tadashi

このほど、世界最大規模(2,820 MW)となる純揚水発電所として、東京電力(株)神流川発電所1号機の営業運転が開始された。東芝がこの発電所向けに設計・製作したポンプ水車は、次のような世界的な記録と特長を持つ製品である。

- (1) 最大出力482 MWの世界最大^(注1)単機容量のポンプ水車で、世界有数の728 mの揚程を持つ。
- (2) 長翼と短翼が各5枚のスプリッターランナを世界で初めて^(注2)採用し、効率の向上や水圧脈動の低減による運転範囲の拡大と信頼性の向上が実現した。
- (3) ガバナ制御にAPFC(Automatic Power and Frequency Control)運転時のサージタンクの水位変動抑制が可能なアドバンス制御方式を採用し、発電所建設コストの低減に貢献した。

The first unit at the Kannagawa Pumped-Storage Power Station of The Tokyo Electric Power Co., Inc. was recently commissioned. This new facility is equipped with a high-head reversible pump-turbine having the largest capacity in the world.

The equipment designed and manufactured by Toshiba for this power station represents a number of impressive firsts. The reversible pump-turbine has the world's largest unit capacity of 482 MW, and the pumping head of 728 m ranks among the world's highest. A splitter runner with five long blades and five short blades in circumferentially alternate positions was adopted as an advanced technology, and has contributed to a wider operating range and higher reliability of the pump-turbine through its higher hydraulic performance and smaller pressure fluctuation than conventional runners. An advanced control governor based on the latest numerical technology was also adopted, contributing to a reduction in construction costs through its function of suppressing water surges in the waterway during automatic power and frequency control (APFC) operation.

1 まえがき

揚水発電所は、電力システムの有効活用のために不可欠であり、経済性追求の一環として、ポンプ水車の大容量化や高落差化が進んでいる。このほど、可逆回転式ポンプ水車として世界最大の単機容量で、かつ、世界有数の高落差発電所として、最新の技術を採用した東京電力(株)神流川発電所1号機の営業運転が開始された。

東芝がこの発電所向けに設計・製作した、記録的な大容量・高落差のポンプ水車は、ユーザーである東京電力(株)と当社が共同し、これまでこの分野で蓄積した技術を結集するとともに、各種の新技术開発に取り組むことで、実現したものである。

ここでは、このポンプ水車の特長と運転結果及び、ガバナの制御方式と検証結果について述べる。

2 発電所の概要

東京電力(株)神流川発電所は、信濃川水系南相木川の最上流部に高さ136 mのロックフィルダム(南相木ダム)を建設(注1)、(注2)、(注3) 2005年12月現在、当社調べ。

して上部調整池とし、利根川水系神流川の最上流部に高さ120 mの重力式ダム(上野ダム)を建設して下部調整池としており。この間で得られる有効落差653 mを利用し、完成時にはポンプ水車と発電電動機6台により最大出力2,820 MWを発電する、世界最大規模の純揚水発電所となる。また、主要機器がすべて地下室内に設置される、完全地下式発電所である。

神流川発電所の運転は遠隔常時監視制御方式によって行われ、発電APFC運転並びに揚水運転を行うとともに、水面押下げによる発電及び揚水調相運転なども行う。

当社は神流川発電所に、ポンプ水車のほか、ガバナや圧油装置などを納入した。

3 ポンプ水車の特長と運転結果

3.1 ポンプ水車要項

- (1) 型式 立軸単輪単流うず巻フランシス形ポンプ水車
- (2) 水車
 - (a) 有効落差 最高 675 m, 基準 653 m, 最低 617 m
 - (b) 最大出力 482 MW
 - (c) 最大流量 85 m³/s
 - (d) 定格回転速度 500 min⁻¹

(3) ポンプ

- (a) 全揚程 最高 728 m, 最低 677 m
- (b) 最大軸入力 464 MW
- (c) 揚水量 60m³/s
- (d) 定格回転速度 500 min⁻¹
- (e) ポンプ比速度 29.2 m·m³/s

(4) その他

- (a) 過渡時最大無拘束速度 755 min⁻¹
- (b) 最大速度変動率 47 %
- (c) 最大水圧値 1,079 m
- (d) 吸出し高さ -112~-134 m

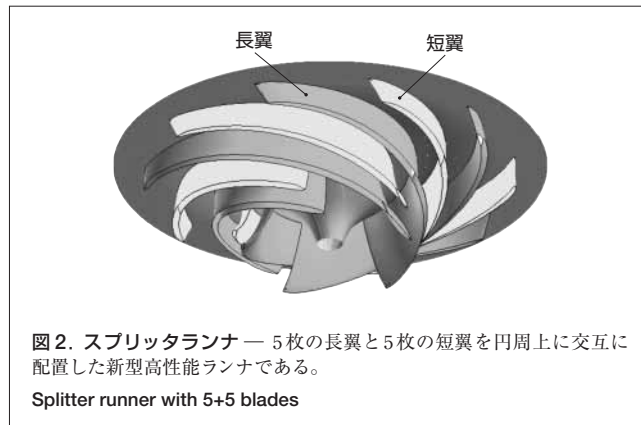
3.2 特長

神流川発電所のポンプ水車は、揚水発電所としては世界最大容量機であり、東京電力(株)葛野川発電所に次ぐ超高落差機である。設計にあたっては、葛野川発電所向けポンプ水車などの超高落差機の設計を参考にするとともに、ポンプ水車としては世界で初めてとなる、5枚の長翼間に5枚の短翼を配置したスプリッターランナを採用し、運転範囲の拡大と信頼性の向上を図った。この技術は、2004年度のオーム技術賞と文部科学大臣賞を受賞している。

長翼と短翼で合計10枚のランナ羽根枚数に対応し、ガイドベーン枚数は16枚とした。また、ステーベーンは、機器のコンパクト化や剛性向上の観点から16枚としている。吸出し管の押込み圧が10気圧を超える高压空気中でも長時間の調相運転(空転運転)を可能にするため、低漏気型ドラフトチューブ形状を採用した。また、超高落差であるとともに吸出し高さが深いことに対応し、主軸封水部には事前に封水模型試験で検証された新型パッキングを採用しており、実運転でも高性能・高信頼性が実証された。

3.3 スプリッターランナ⁽¹⁾

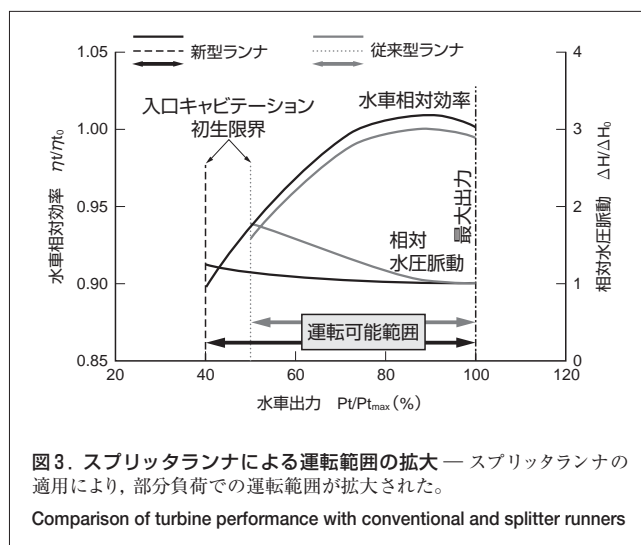
神流川発電所のスプリッターランナを図1に示す。図2はこのランナの模式図であり、5枚の長翼と5枚の短翼が円周上



に交互に配置された構造となっている。このランナは、水車運転時には、多翼化による整流効果で過負荷や部分負荷運転での効率を向上させ、ポンプ運転時には、多翼化によるすべり低減効果でランナ外径の縮小化を図ることができる。一方、多翼化に際しては、ランナの製作や保守作業も考慮し、流路スペースを確保するために1枚おきに羽根を短くした。

スプリッターランナの開発では、短翼が長翼に比べて翼負荷が減少する影響を低減するために、短翼の性能向上がポイントとなる。これに対しては、流れ解析や模型試験を通じて開発を進め、翼長、形状、翼の配置などを最適化している(特許出願中)。

図3は、スプリッターランナの適用により、部分負荷運転での水圧脈動低減、水車効率向上、運転範囲拡大の効果を示したものである。これらの効果により、神流川発電所では、当初計画の水車最大出力463 MWを482 MWまで拡大することができた。更に、ランナの羽根枚数増加により、ランナベーンとガイドベーンの水圧干渉が低減され、ランナ外周の水圧脈動を低減することができた。また、多翼化によりランナの剛性が高くなり、共振周波数を定格回転速度から大幅に



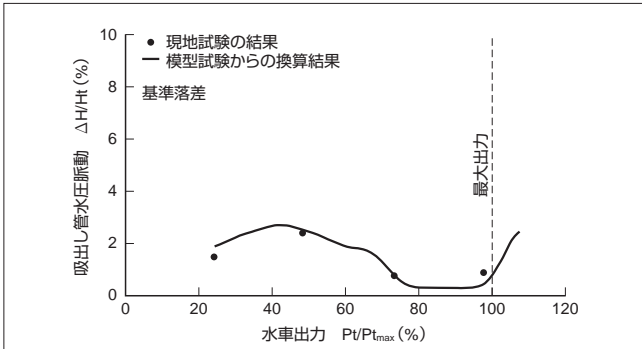


図4. 抽出し管の水圧脈動測定結果 — 水車模型試験からの換算結果と現地試験の結果はよく一致している。

Results of turbine model test and field test for pressure fluctuation in draft tube

離すことができるとともにランナの振動応力も低減でき、信頼性も向上している。

3.4 現地試運転結果

神流川発電所では、2004年9月から2005年12月まで上部調整池をたん水しながら各種の有水試験が行われ、いずれの試験でも所定の性能が実証された。

上部調整池への初揚水は、導水路の途中まで充水ポンプで充水した後、ポンプ水車の揚水運転による方法で行われた。また、負荷遮断時の水圧上昇を低減するために考案されていたガイドベーン閉鎖方式を実運転で初めて採用し、現地試験でその効果が確認された。

スプリッターランナの採用による部分負荷運転時の安定性も確認され、体感的にも非常に静粛であるとの評価が得られた。また、水圧脈動も十分低いレベルであり、模型試験で確認したとおり、40%の部分負荷出力まで問題なく運転できることが実証された。図4は、抽出し管での水圧脈動につき模型試験と現地試験の結果を比較したもので、脈動レベルは低く、両者の結果もよく一致している。

4 ガバナの制御方式と検証結果

従来、水力発電所用ガバナへの要求機能は、負荷変動に対する出力調整(速応性)及び並列前の水車の定格速度での安定制御であった。アドバンストガバナは、更にサージタンクの水位変動抑制機能を加えたものである。図5は、神流川発電所の水路の構成を示したものである。図6に示すとおり、従来のPID(比例、積分、微分)制御方式のガバナに比べてアドバンストガバナは水位変動の抑制に優れており、これによりサージタンクの容量が低減できて、発電所の建設コスト低減に大きく貢献した。

4.1 アドバンストガバナの制御方式⁽²⁾

アドバンストガバナにおける制御方式は、現代制御理論に

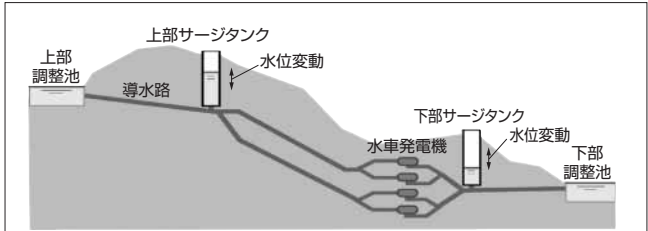


図5. 水路の構成 — 1条2分岐2分岐の水路には、上部と下部にサージタンクが設けられている。

Configuration of waterway

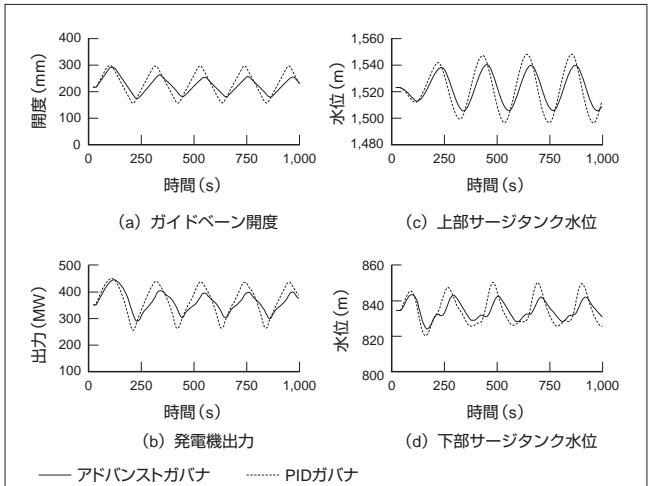


図6. PIDガバナとアドバンストガバナの機能比較 — アドバンストガバナ機能により、サージタンクの水位変動抑制の効果が現れている。

Comparison of simulation results for proportional-integral-derivative (PID) control governor and advanced control governor

基づいて設計したLQG (Linear Quadratic Gaussian) 制御とフィードフォワード制御から成り、従来は困難であったサージタンクの水位変動の低減と負荷追従性の向上を両立することを特長としている。これを実現するために、フィードバック信号からソフトウェアセンサ(カルマンフィルタ)でサージタンクの水位変動の状態を推定し、その状態推定に基づい

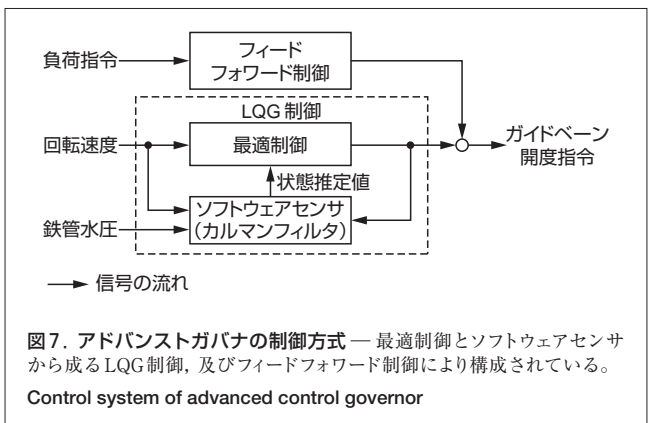


図7. アドバンストガバナの制御方式 — 最適制御とソフトウェアセンサから成るLQG制御、及びフィードフォワード制御により構成されている。

Control system of advanced control governor

て水位変動の拡大を防止するように発電使用流量を適切に制御し、水位変動を抑える仕組みである(図7)。

4.2 サージタンクの水位変動抑制機能の検証

アドバンストガバナに適用する制御技術の実用化にあたり、水車の回転速度に対する制御性の向上及び、小規模系統時のガバナの安定性を重視した処理方式や制御パラメータについて、シミュレーションでの検討を行い、神流川発電所への適用に問題がないことを事前に確認した。これをコントローラ上のプログラムでリアルタイムに制御するために、サイクリック演算処理で実現可能なソフトウェア処理を開発した。また、シミュレーション結果と制御装置を用いた応動結果が同様であることを検証する手順として、第1段階では工場試験により、第2段階では現地無水試験により、応動結果とシミュレーション結果とが一致することを確認した。第3段階では、有水試験での実動作を比較した。この結果、シミュレーション結果と実機動作の相似性及びサージタンクの水位変動抑制機能が確認できた。

4.3 有水試験結果

上部サージタンクの水面が変動する固有周期(210秒)とAPFC指令値の変動周期を合致させた有水試験の結果は図8に示すとおりであり、シミュレーション結果と実機動作がよく一致していることが確認できた。これにより、サージタンクの固有周期で出力指令値が変動した場合にも、サージタンクの水位変動が拡散することなく安定した制御が可能であることが確認できた。

以上のとおり、サージタンクの固有周期に対応するAPFC指令値の変化に対しても、水位変動を抑制できるアドバンスト

ガバナ機能の現地試験が完了し、世界初^(注3)のアドバンストガバナが実用化された。また、いかなる系統状態においても自立的に安定運転を継続できるように、負荷変動に応じたゲインの自動調整機能を付加し、この有効性も評価できた。

5 あとがき

以上、神流川発電所のポンプ水車の特長と運転結果及び、ガバナの制御方式と検証結果について述べた。

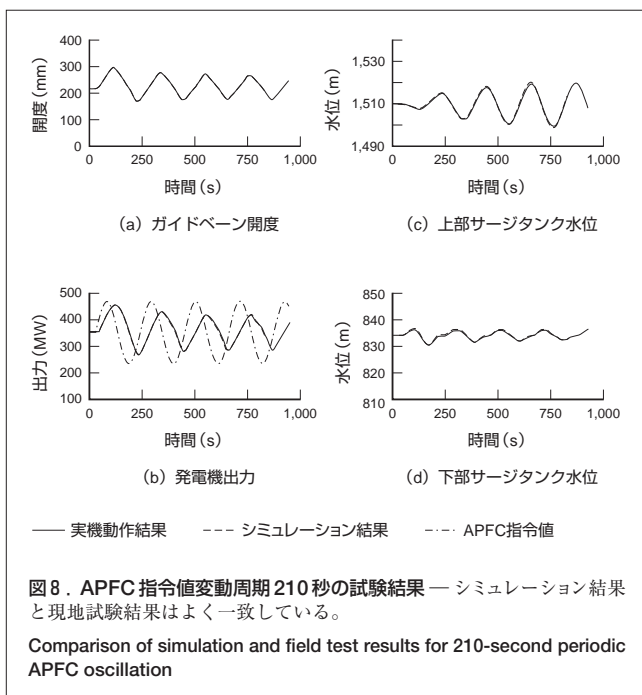
揚水発電所の経済性を追求して、大容量・高落差化を実現する技術目標が掲げられるなかで、ユーザーとメーカーが一体となって設計上及び品質管理上の問題点を徹底的に洗い出し、長期間にわたって検討を重ねてきた成果と考える。特に今回、ポンプ水車の最大出力の増大に加えて、運転範囲の拡大、信頼性の向上、及び発電所建設コストの低減といった目標・課題に取り組み、この解決策として前記の新技术を適用し、満足すべき結果を得ることができた。

謝辞

このポンプ水車の設計、製作にあたり、終始適切なお指導をいただいた東京電力(株)の関係各位に深く感謝の意を表します。

文献

- 田口 忠, ほか. ポンプ水車スプリッターランナの開発. ターボ機械. 29, 12, 2001, p.376-744.
- 稲垣守人, ほか. アドバンスト制御を用いた水力発電所水位サージ抑制方法. 電気学会論文誌. 112-B, 6, 2002, p.761-768.



戸田 一典 TODA Kazunori

電力システム社 火力・水力事業部 水力プラント技術部グループ長。水力発電プラントのエンジニアリング業務に従事。

Thermal Power & Hydroelectric Power System & Services Div.



黒川 敏史 KUROKAWA Toshifumi

電力システム社 京浜事業所 水力機器部グループ長。水力発電プラント向け水車・ポンプ水車の設計に従事。日本機械学会会員。

Keihin Product Operations



近内 忠 KONNAI Tadashi

電力システム社 府中事業所 発電制御システム部主務。水力発電プラントの設計・開発に従事。

Fuchu Operations