

高落差・大容量の揚水発電所で実証された 低振動・高信頼性技術

Technologies to Achieve Reduction in Vibration and High Reliability Exemplified by High-Head and Large-Capacity Pumped Storage Power Station in China

加藤 真敏 KATO Masatoshi 黒川 敏史 KUROKAWA Toshifumi 王 慶 WANG Qing 陳 泓宇 CHEN Hongyu

東芝エネルギーシステムズ(株)の水力発電事業の中国拠点である東芝水電設備(杭州)有限公司(THPC)は、落差が500m級で単機出力が320MWの高落差・大容量揚水発電設備と各種周辺設備(BOP: Balance of Plant)を、中国南方電網調峰調頻発電会社の清遠揚水発電所に納入した。清遠揚水発電所では、2016年8月までに全4台の営業運転が開始され、その後の運転で低振動、高信頼性、及び高稼働率が実証されている。

ポンプ水車には、当社が揚水発電用に世界に先駆けて開発した、長翼と短翼を組み合わせたスプリッターランナを採用することで、水圧脈動を低減し、部分負荷でも振動の小さい安定した運転を実現した。また、厳しい水路条件に対し、水路系過渡現象シミュレーション解析を駆使して安全な運転制御方法を確立し、中国の揚水発電所では初の4台同時負荷遮断試験にも成功した。

The Qingyuan Pumped Storage Power Station of China Southern Power Grid Co., Ltd. has four pumped storage units with a pumping head of more than 500 m and a capacity of 320 MW. Toshiba Hydro Power (Hangzhou) Co., Ltd., a subsidiary of Toshiba Energy Systems & Solutions Corporation in China, supplied the four main units and various balance-of-plant (BOP) systems. The final pumped storage unit started commercial operation in August 2016. We have confirmed that each unit offers a low-vibration condition, high reliability, and a high operation rate through the results of commercial operation since then.

A splitter runner consisting of long and short blades for the pump-turbine, which Toshiba Energy Systems & Solutions Corporation developed for pumped storage power generation ahead of its competitors in the world, has been employed to reduce pressure fluctuations and vibration, even during partial-load operation. Optimized methods for plant operation and pump-turbine control under the severe conditions of the water conduit system have also been established based on the results obtained from hydraulic transient analyses. As a result of these technologies, a simultaneous load rejection test on all four units was successfully conducted, the first time that such a test had been carried out at a pumped storage power station in China.

1. まえがき

東芝エネルギーシステムズ(株)は、揚水発電所の経済性向上を目的に、高落差化と大容量化で常に世界をリードする開発を行って来た。1970年代の初頭には、既に揚程500mを超えるポンプ水車を完成し、2014年には、東京電力ホールディングス(株)葛野川発電所で世界最高^(注1)揚程785mの可変速ポンプ水車が運転を開始した⁽¹⁾。

一方、近年中国では、総出力が百万kW以上の高落差・大容量の揚水発電所が、毎年数か所というペースで急ピッチに建設されており、既に我が国を抜いて世界最大の揚水発電設備容量となっている。THPCは、落差が500m級で単機出力が320MWの高落差・大容量揚水発電設備と各種

(注1) 2014年12月現在、単段ポンプ水車として、当社調べ。

BOPを、中国南方電網調峰調頻発電会社の清遠揚水発電所向けに納入した。清遠揚水発電所は、その群を抜く低振動、高信頼性、高稼働率が、中国で注目を集めている。ここでは、当社が清遠揚水発電所に投入した技術を述べる。

2. 清遠揚水発電所の概要

清遠揚水発電所は、中国広東省広州市の北西約70kmに位置し、広州市を取り囲むように多数建設されている大容量揚水発電所の一つで、最高全揚程が509.08mで、単機出力320MWのユニット4台を持ち、総出力は128万kWである(図1)。

スプリッターランナをはじめ、当社が長年培ってきた高落差・大容量揚水発電技術の成果を投入し、運転中のユニット上に立てたコインが倒れないほど振動の小さい揚水



図1. 清遠揚水発電所の全景

初号機の運転開始から2年以上にわたって、低振動、高信頼性、高稼働率を実証している。

Qingyuan Pumped Storage Power Station, China

発電所を実現した。THPCの供給範囲は、主機、各種BOP設備4セット、据え付け指導、及び発電所全体の現地調整試験であり、当社が国内外で培ってきたノウハウを生かし、THPCが主体となってこのプロジェクトを完遂した。ポンプ水車、入口弁、及び発電電動機は、当社の基本設計の下、THPCが詳細設計と製造を行って、揚水発電設備の中国での国産化を果たした。

3. ポンプ水車

3.1 ポンプ水車の仕様

ポンプ水車の仕様は、以下のとおりである。

- (1) 形式 立軸渦巻単段フランシス形ポンプ水車
- (2) 有効落差 最高：502.73 m，最低：440.39 m
- (3) 全揚程 最高：509.08 m，最低：450.72 m
- (4) 最大出力 326.5 MW
- (5) 最大軸入力 331 MW
- (6) 回転速度 428.6 min⁻¹

3.2 スプリッターランナ

高落差・大容量ポンプ水車で最も重要な問題は、運転中の振動である。これを克服し、同時に水車効率とポンプ効率を向上する手段として、図2に示すように、ランナ内部の翼に長翼と短翼の2種類を組み合わせたスプリッターランナを、揚水発電向けとして当社が世界に先駆けて開発した。まず、比較的低落差な機種への適用を経て、2001年には世界最大級容量で最大出力が482 MW、最高揚程が728 mの東京電力ホールディングス(株)神流川発電所向け



図2. スプリッターランナ

長翼と短翼を交互に配置し、各種設計パラメーターをDOEで最適化することで、振動の小さい安定した運転を実現した。

Splitter runner

に適用し、製造完成後、2005年に営業運転を開始した⁽²⁾。当社が揚水発電所向けにスプリッターランナを納入したのは、清遠が3例目であり、水圧脈動を低減し、40%程度の部分負荷でも、振動の小さい安定した運転を実現した。ランナの性能開発には流れ解析(CFD: Computational Fluid Dynamics)を活用し、ランナ設計パラメーターを実験計画法(DOE: Design of Experiment)で最適化した⁽³⁾。また、模型試験で更に最適化して性能を確認し、図3に示すように、スイス・ローザンヌ工科大学(EPFL: Swiss Federal Institute of Technology in Lausanne)で第三者による性能検証模型試験も行った。

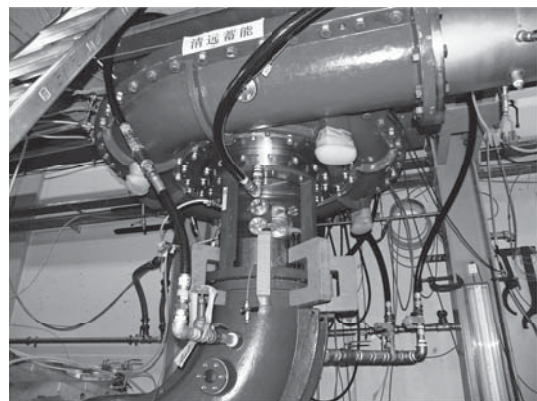


図3. 第三者による性能検証模型試験

模型試験で最適化した性能を確認し、更に第三者による検証模型試験をEPFLで実施した。

Third-party model test conducted by Swiss Federal Institute of Technology in Lausanne (EPFL)

3.3 そのほかの構造的特徴

中国の揚水発電所では、従来、中間軸方式としてポンプ水車を横方向に分解する構造が多かったが、ポンプ水車をコンクリートで全体的に埋設支持することで振動抑制に効果的な、上方向分解構造を採用した。また、主軸シールも、中国の揚水発電所で一般的な軸方向シールではなく、高落差揚水発電所での実績が豊富なカーボンパッキン径方向シールを採用しており、使用状態は安定して良好な運転を維持している。

3.4 入口弁

口径2,376 mmの球形弁で、鉄管水圧操作方式を採用し、水圧サーボモーターは、長期的な信頼性を確保するために、当社で独自に設計と製造を行った。

3.5 水路系過渡現象解析

清遠揚水発電所は、図4に示すように、土木コスト低減のため発電設備の上流水路、下流水路ともに1条4分岐で、しかも上流サージタンク省略という、世界でもまれな厳しい水路構成である。更に、送電線が当面は1回線しかなく、遠方負荷遮断が発生するリスクが比較的高い。このことから、複数ユニットが時間差で負荷遮断する場合を含め、様々な特殊ケースについて、数多くの水路系過渡現象シミュレーション解析を行い、安全に運転するための制御方法を決定した。負荷遮断時には、鉄管水圧上昇を抑えるため、ガイドベーンは2段階の速度で、入口弁とともに全閉まで時間を掛けて閉鎖する。また、複数ユニットが時間差で負荷遮断した場合に吸出し管の水圧が異常低下して水柱分離現象

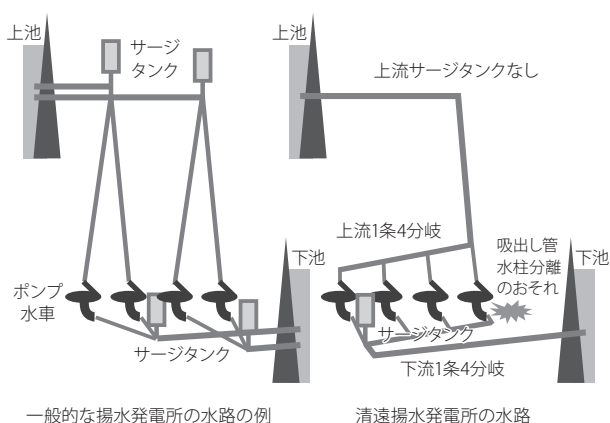


図4. 清遠揚水発電所の水路条件

世界でもまれな、厳しい条件のため、制御方法は、特殊ケースを含め数多くの過渡現象解析でリスクを予測して決めた。

Conditions of water conduit system

象が発生する危険を避けるため、特定の条件で1台のユニットに負荷遮断が発生した場合、他ユニットも直ちにトリップさせる制御方法を採用した。

4. 発電電動機

4.1 発電電動機の仕様

- (1) 形式 立軸回転界磁準傘型水冷熱交換器形三相同期発電電動機
- (2) 定格容量 発電機：356 MVA 電動機：331 MW
- (3) 定格電圧 15.75 kV
- (4) 定格回転速度 428.6 min⁻¹
- (5) 定格周波数 50 Hz
- (6) 定格力率 発電機：0.9 電動機：0.95

4.2 発電電動機構造の特徴

回転子には、図5に示すように、高速機に適した厚板リングリム構造を採用した。

5. 各種BOP設備

当社の指導の下、THPCがBOPの専門設計チームと調達推進チームを立ち上げ、以下のように幅広いBOPを調達した。主要なBOPには、実績の豊富な輸出品あるいは外資系メーカーの製品を採用した。

- (1) 監視制御・保護設備 ネットワーク分散型監視制御システム(図6)、保護装置(発電電動機、主変圧器、超高压ケーブル)、状態監視装置、制御ケーブルなど
- (2) 機械設備 放水路非常閉鎖ゲートシステム(ゲート操作用サーボモーターのピストンロッドにはセラミック溶

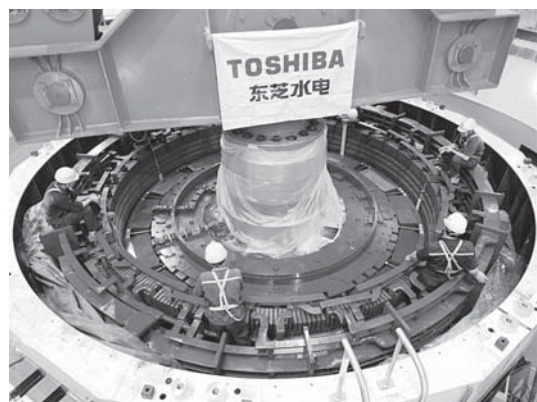


図5. 発電電動機の回転子の取り付け

回転子には高速機に適した厚板リングリム構造を採用している。

Installation of rotor



図6. 監視制御室

監視制御装置の上位系設備が納入されている。

Supervising control room

射), 调速機, 圧油装置, 入口弁制御装置, 空気圧縮装置, 給水装置, 潤滑油装置, 二酸化炭素消火装置, プレハブ配管, バルブなど

- (3) 電気設備 サイリスター始動装置, 励磁装置(励磁母線は固体絶縁導体), 主回路設備, 所内電源設備(高圧, 低圧), 直流・無停電電源設備, モーターコントロールセンター, 非常用ディーゼル発電設備など

6. 現地調整試験

発電所全体の調整試験は, THPCが調整試験チームを立ち上げ, 当社の全面的な指導と客先の協力の下に遂行した。

6.1 4台同時負荷遮断試験

各ユニットが有水試験を完了して営業運転に入るたび, 表1に示すような複数ユニットの同時負荷遮断試験を実施した。最後には, 中国では初の4台同時負荷遮断試験を行い, 図7に示すように, 無事に成功した。前述したとおり, 世界でもまれな厳しい水路条件であることから, 負荷遮断試験の実施には特に慎重かつ入念に準備を行い, 試験ごとに同一条件での水路系過渡現象シミュレーション解析を実施し, 試験結果と一致して安全であることを確認してから次の試験に進んだ。ケーシング最大水圧, 吸出し管最小水圧, 及び最大回転速度が全て保証値内であることや, 試験後の点検で異常がないことを確認した。

6.2 入口弁流水遮断試験

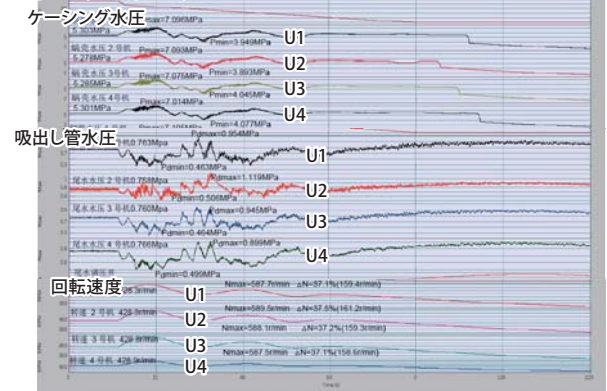
入口弁の流水遮断能力を確認するため, 100%流量での流水遮断試験を実施した。流水遮断の最中でも入口弁の開動作は安定しており, 試験終了後も入口弁シートからの漏水量はほとんどゼロで, 異常はなかった。

表1. 複数台同時負荷遮断試験結果

Results of simultaneous load rejection test on multiple units

項目		単独遮断	2台同時遮断	3台同時遮断	4台同時遮断
ケーシング最大水圧 (MPa)	予想値	6.27	6.99	7.07	7.25
	試験値	5.89	6.84	6.99	7.10
	保証値	7.65			
吸出し管最小水圧 (MPa)	予想値	0.60	0.49	0.46	0.33
	試験値	0.74	0.58	0.52	0.46
	保証値	0.12			
最大回転速度 (min ⁻¹)	予想値	547.6	586.8	591.6	606.0
	試験値	545.3	572.1	576.2	587.7
	保証値	621.5			

サーボモニターストローウ



U: ユニット

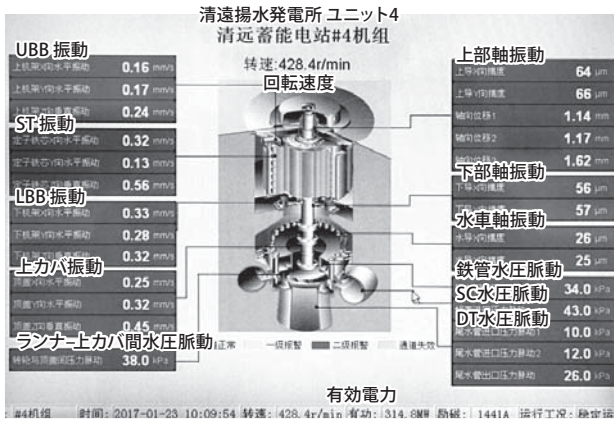
図7. 4台同時負荷遮断試験結果

表1にも示すとおり, 全て保証値を満足した。この試験の成功は, 中国の揚水発電所では初の快挙となった。

Results of simultaneous load rejection test on all four units

7. 営業運転開始後の運転状況

初号機の営業運転開始から既に2年間以上, 4台目の営業運転開始からも約1年半が経過しているが, 主機に係る運転障害は皆無である。状態監視装置の表示例を図8に示す。水圧脈動, 静止部振動, 軸振動ともに非常に小さく, 運転状態は極めて安定している。営業運転開始以降の, 発電運転及び揚水運転での起動成功率, 停止成功率は, 表2に示すように, 99.5~100%であった。また, 初号機の2016年1月から2年間の累計運転時間は5,550hに達し, 稼働率(=合計運転時間/(運転開始後日数×24h))は, 全ユニットで32~38%と, ピーク対応が目的である揚水発電所としては非常に高いレベルであり, 信頼性の高さや電力システムへの大きな貢献を証明している。



UBB : 上部軸受ブラケット ST : 固定子 LBB : 下部軸受ブラケット
SC : スパイラルケーシング DT : 吸出し管

図8. 状態監視装置の表示例

運転状態は極めて安定しており、定格負荷付近では、水圧脈動は1%を大幅に下回り、静止部振動は1mm/s以下、軸振動は数十μmしかない。

Example of operating condition monitoring display

表2. 清遠揚水発電所の各ユニットの運転実績

Operation records of each unit

項目	1号機	2号機	3号機	4号機
営業運転開始日 (年/月/日)	2015/11/30	2016/3/16	2016/6/2	2016/8/20
運転開始後日数 (日)	730	655	577	498
運転回数(発電) (回)	789	770	584	639
運転回数(揚水) (回)	506	495	411	448
運転時間(発電) (h)	2,684	2,572	2,052	2,135
運転時間(揚水) (h)	2,866	2,667	2,333	2,416
合計運転時間 (h)	5,550	5,239	4,385	4,551
稼働率 (%)	32	33	32	38
起動成功率(発電) (%)	99.6	99.5	99.7	100.0
起動成功率(揚水) (%)	100.0	100.0	100.0	99.8
停止成功率(発電) (%)	99.9	99.6	100.0	99.7
停止成功率(揚水) (%)	100.0	99.6	99.5	99.6

*集計期間：2016年1月1日から2017年12月31日まで

8. あとがき

高落差・大容量揚水発電に関し、長年の研究開発の中で当社が培った技術を注ぎ込んだ設備が、中国でも低振動、高信頼性、高稼働率で好評を博している。太陽光発電や風力発電といった変動の大きい発電手段の割合が世界中で急激に増大していることに伴い、大規模な電力貯蔵手段としての揚水発電所が、世界中で再び脚光を浴びており、多数の高落差・大容量揚水発電所の新たな建設や、更新による出力増大や機能向上が図られている。例えば中国は、第13次5か年計画で、2016年から2020年までの間に、揚水発電

設備を1,700万kW増やすことを目標に急ピッチで建設を進めている。電力を蓄えて、あるいは平準化して使うというトレンドは、世界の国々の発展と環境保護の両立を目指すものであり、今後ますます盛んになると考えられる。当社は、揚程700mを超えるような高落差機や、可変速揚水発電システムに関して長い経験と豊富な実績があり、これらの分野で高い技術力を保有している。今後も、世界中の揚水発電所の開発や、更新による機能向上に貢献していく。

文献

- (1) 藤田 崇, ほか. 東京電力(株)葛野川発電所4号可変速機の運転開始. 東芝レビュー. 2015, 70, 1, p.7-10.
- (2) 戸田一典, ほか. 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. 2006, 61, 5, p.58-61.
- (3) Enomoto, Y. et al. "Development of a high head reversible pump-turbine with a splitter blade runner". Hydro2016. Montreux, Switzerland, 2016-10, The International Journal on Hydropower & Dams. 2016, 13d03.



加藤 真敏 KATO Masatoshi
東芝エネルギーシステムズ(株)
火力・水力事業部 水力プラント技術部
Toshiba Energy Systems & Solutions Corp.



黒川 敏史 KUROKAWA Toshifumi
東芝エネルギーシステムズ(株)
京浜事業所 水力機器部
日本機械学会会員
Toshiba Energy Systems & Solutions Corp.



王 慶 WANG Qing
東芝水電設備(杭州)有限公司
水機部
Toshiba Hydro Power (Hangzhou) Co., Ltd.



陳 泓宇 CHEN Hongyu
中国南方電網調峰調頻發電公司
China Southern Power Grid, Power Generation Company