

北海道電力(株) 京極発電所1号可変速機の運転開始

Commencement of Commercial Operation of Kyogoku Hydroelectric Power Station Unit 1 of Hokkaido Electric Power Co., Inc. Equipped with Adjustable-Speed System

田中 健弘

■ TANAKA Takehiro

坂本 茂

■ SAKAMOTO Shigeru

塩崎 裕一

■ SHIOZAKI Yuichi

札幌市の南西約35 kmに位置する北海道電力(株) 京極発電所1号可変速機が2014年10月1日に営業運転を開始した。この発電所は、北海道電力(株)として初めての純揚水式発電所(総出力600 MW: 200 MW×3台)であり、可変速揚水発電システムを適用して、ピーク供給力と電力系統の調整能力を担った発電所である。

東芝は、水力資源の有効活用に寄与する可変速揚水発電システムを世界に先駆けて1990年に実用化した。今回の京極発電所は、可変速機として初めて二次励磁装置の電力変換装置にIEGT (Injection Enhanced Gate Transistor) 素子を採用し、二次励磁装置のコンパクト化及び損失低減を実現した。また、ポンプ水車にガイドベーン下抜き構造を採用し、ガイドベーンブッシュ(軸受)を容易に点検できる構造とした。京極発電所は、今後、北海道の電力系統安定化に寄与すると期待されている。

Unit 1 of the Kyogoku Hydroelectric Power Station of Hokkaido Electric Power Co., Inc., located in the northeastern area at the base of Mt. Yoteizan about 35 km southwest of Sapporo City, entered commercial operation on October 1, 2014. This is the first solely pumped-storage type power plant (max. 600 MW, 200 MW × 3 units) applying an adjustable-speed system with peak-power supply capability and the ability to suppress fluctuations in frequency.

Toshiba put the world's first adjustable-speed pumped-storage hydropower system into practical use in 1990 for the effective utilization of water resources. We have now applied injection enhanced gate transistors (IEGTs) to power conversion equipment in the AC excitation system of an adjustable-speed system for the first time, resulting in reductions in dimensions and loss. We have also developed the structure of a pump-turbine that allows the guide vanes to be disassembled from the lower side, for easy inspection. The Kyogoku Hydroelectric Power Station is expected to contribute to the stability of the electric power grid in Hokkaido.

1 まえがき

北海道には、太陽光や風力などの再生可能エネルギーによる発電が数多く導入されているが、これらは気象条件の影響により出力が大きく変動する。可変速揚水発電システムは、発電電動機の回転速度を変えることで揚水運転時の入力電力を変えられるため、これを利用して再生可能エネルギーによる発電に伴う電力系統の変動を抑制できる。京極発電所は、北海道のピーク供給力の増強と電力系統安定化への寄与が期待され、可変速揚水発電システムを3台導入する計画で、その1号機が2014年10月1日に営業運転を開始した。

ここでは、東芝が京極発電所へ納入した主な機器の特長とそれらに採用した技術の概要について述べる。

2 発電所の概要

京極発電所は、札幌市の南西約35 km、蝦夷富士と呼ばれる羊蹄山の麓にある京極町の北東部に位置する。標高(EL.)約900 mの台地にプールタイプの上調整池を建設し、尻別川水系ペーベナイ川上流部にロックフィルタイプの京極ダムを下部調整池として建設した、基準有効落差369 mの純揚水式

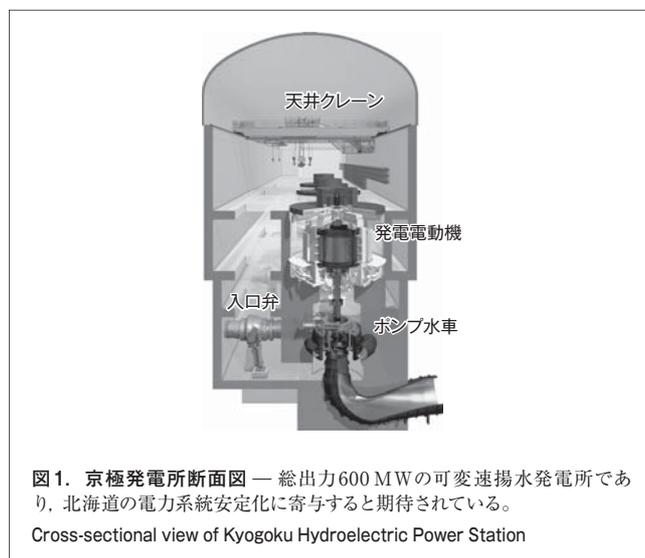


図1. 京極発電所断面図 — 総出力600 MWの可変速揚水発電所であり、北海道の電力系統安定化に寄与すると期待されている。

Cross-sectional view of Kyogoku Hydroelectric Power Station

の発電所である。京極発電所は、1台当たり200 MW発電する可変速機が3台設置され、総出力は600 MWになる予定である。京極発電所の断面図を図1に示す。

当社は、発電所の主要機器であるポンプ水車、発電電動機、二次励磁装置、サイリスタ始動装置、監視制御装置、及び主要変圧器の納入、据付、並びに調整試験を行った。

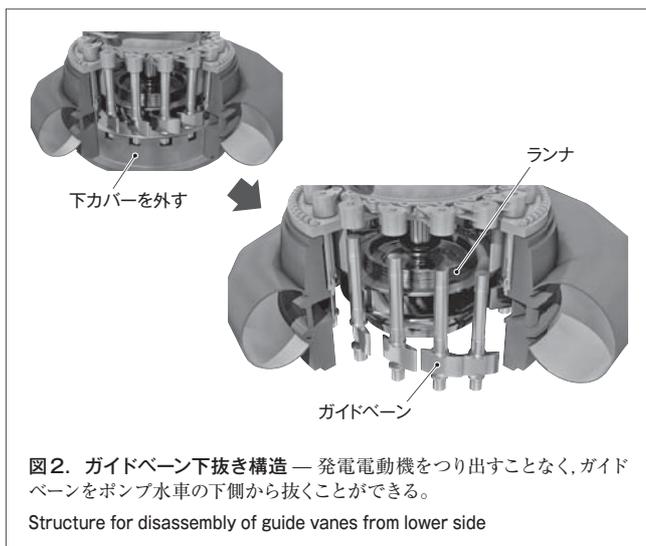


図2. ガイドベーン下抜き構造 — 発電電動機をつり出すことなく、ガイドベーンをポンプ水車の下側から抜くことができる。
Structure for disassembly of guide vanes from lower side

3 ポンプ水車

3.1 ポンプ水車仕様

ポンプ水車の仕様を以下に示す。

- (1) 形式 立軸単輪単流渦巻フランシス形ポンプ水車
- (2) ポンプ水車仕様
 - (a) 有効落差 最高：414.2 m, 最低：337.0 m
 - (b) 全揚程 最高：436.5 m, 最低：363.6 m
 - (c) 最大出力 208 MW
 - (d) 最大軸入力 230 MW
 - (e) 回転速度 475 ~ 525 min⁻¹

3.2 ガイドベーン下抜き構造

ガイドベーンは、ポンプ水車のランナ周囲に配置され、ランナに流れ込む水量の調整を行う部品である。運転中は流量調整で絶えずガイドベーンが動作しているため、ガイドベーンブッシュ（軸受）が摩耗しやすい。通常、ブッシュ交換は、発電電動機をつり出す必要があるが、今回、ガイドベーンをポンプ水車の下側から抜くことができる構造を採用することで、発電電動機をつり出すことなくブッシュを交換できるようにして、メンテナンス性を向上させた（図2）。

4 発電電動機

4.1 発電電動機仕様

発電電動機の外観を図3に、仕様を以下に示す。

- (1) 形式 立軸回転界磁水冷熱交換器形同期発電電動機
- (2) 定格容量（発電機） 230 MVA
- (3) 定格容量（電動機） 230 MW
- (4) 定格周波数 50 Hz
- (5) 定格力率（発電機） 0.9
- (6) 定格力率（電動機） 1.0



図3. 1号発電電動機 — 従来の定速の発電電動機と異なり、巻線型の構造をしている。
Generator-motor for Unit 1

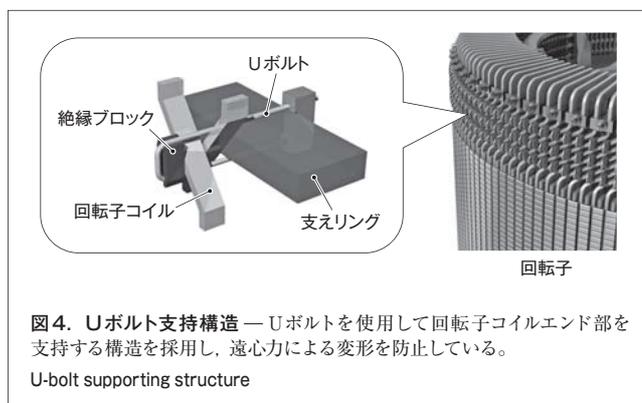


図4. Uボルト支持構造 — Uボルトを使用して回転子コイルエンド部を支持する構造を採用し、遠心力による変形を防止している。
U-bolt supporting structure



図5. 樹脂製軸受 — スラスト軸受のしゅう動面を樹脂製とし、低損失化を実現した。
Nonmetallic thrust bearing pad

4.2 回転子コイルのUボルト支持構造

可変速発電電動機は、従来の定速の発電電動機と異なり、巻線型の構造をしており、回転子のコイルエンド部には、遠心力による外周方向への変形を防止するために、Uボルト支持構造を採用している（図4）。Uボルト支持構造は、バインドによる支持構造とは異なり、現地組立時に大がかりな装置が不要であり、組立及び調整が容易である。

4.3 樹脂製軸受

回転子とランナの重量、及び水スラストを受け止めるスラスト軸受に、摩擦係数が従来の金属製軸受の約1/3と小さい樹脂製軸受を採用し、低損失化を実現した（図5）。

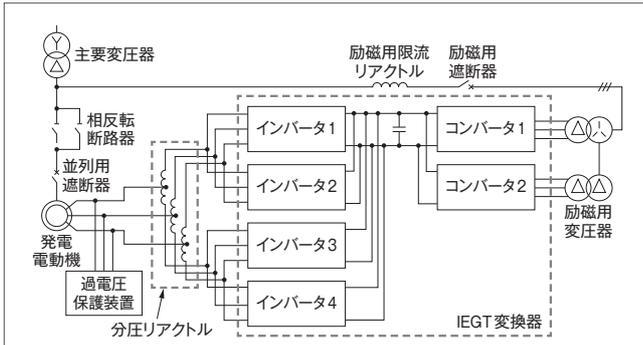


図6. 1号可変速機の単線結線図 — 二次励磁装置にIEGT変換器を適用している。

Single-line diagram of Unit 1

5 二次励磁装置

5.1 二次励磁装置の特長

可変速システムには、従来の定速機の直流励磁方式ではなく交流励磁方式を適用しており、そのために電力変換器で構成される二次励磁装置を採用した。

京極発電所の二次励磁装置の特長を以下に示す。

- (1) 電力変換器にIEGT素子を採用することによる励磁損失の低減及びコンパクト化
 - (2) 分圧リアクトル方式採用による高調波の低減
- 1号可変速機の単線結線図を図6に示す。

5.2 IEGT変換器

二次励磁装置の電力変換器にIEGT素子を適用することで、従来のGTO (Gate Turn-Off Thyristor) 変換器と比較すると、ゲートユニットをコンパクト化でき、スペース及び損失を大幅に低減した。

IEGT変換器の外観を図7に、仕様を表1に、それぞれ示す。

5.3 分圧リアクトル方式⁽¹⁾

分圧リアクトル方式とは、三相ブリッジインバータの出力側に



図7. IEGT変換器 — 二次励磁装置にIEGT変換器を適用することで、スペース及び損失を従来のGTO変換器よりも大幅に低減できた。

IEGT converter/inverter

表1. IEGT変換器の仕様

Specifications of IEGT converter/inverter

項目	IEGTインバータ	IEGTコンバータ
定格容量 (MVA)	24.32	9×2
定格電圧 (kV)	2.71	3.51
定格電流 (kA)	5.18	1.48×2
周波数 (Hz)	-2.5 ~ +2.5*	50

*回転速度475~500 min⁻¹のときは+2.5~0 Hzを出力し、500~525 min⁻¹のときは0~2.5 Hzを出力する(周波数の正負は位相が逆であることを表す)。500 min⁻¹のときは0 Hz (直流)を出力する

表2. 分圧リアクトル方式によるインバータ出力の多重化

Multiplexing by means of center-tap reactor type converter

パターン	回路構成
1	分圧リアクトル 出力 VP インバータ1, 2 出力VP インバータ3, 4 出力VP
2	分圧リアクトル 出力 (VP+VN)/2 (0) インバータ1, 2 出力VP インバータ3, 4 出力VN
3	分圧リアクトル 出力 (VP+VN)/2 (0) インバータ1, 2 出力VN インバータ3, 4 出力VP
4	分圧リアクトル 出力 VN インバータ1, 2 出力VN インバータ3, 4 出力VN

VP: +1出力 VN: -1出力

分圧リアクトルを設けることで、インバータの出力を多重化し、インバータが出力する高調波を低減する方式である(表2)。

三相ブリッジインバータは、+1と-1の2レベルの相電圧を出力するが、分圧リアクトル方式を採用することにより、+1, 0, -1の3レベルの相電圧を出力することが可能になり、高調波の低減が可能になった。

6 サイリスタ始動装置

サイリスタ始動装置は、揚水運転時にポンプ水車と発電電動機を起動させる装置であり、当社にとって、1978年にわが国で初めて関西電力(株)奥吉野発電所へ納入してから、更新を含めて京極発電所で12台目の納入となる。

サイリスタ始動装置(図8)の仕様を以下に示す。

- (1) 容量 17 MW
- (2) 電圧 直流 20 kV
- (3) 電流 直流 850 A

サイリスタ始動装置による揚水始動試験結果を図9に示す。



図8. サイリスタ始動装置 — 当社にとって12台目の納入となるサイリスタ始動装置である。

Static frequency converter (SFC)

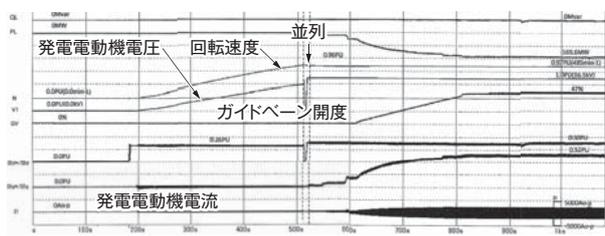


図9. 揚水始動試験結果 — サイリスタ始動装置により、主機を停止状態から定格回転速度付近まで昇速させ、並列している。

Result of startup test using SFC

7 監視制御装置

京極発電所は、ポンプ水車や、発電電動機、二次励磁装置などの主機関係を統括監視制御する主機自動制御装置と、サイリスタ始動装置や所内排水設備などの所内共通設備を監視制御する共通自動制御装置によって、発電所の監視及び制御を行っている。

監視制御装置は、HMI (Human Machine Interface) デバイスを採用して視認性と操作性を向上させており、主機自動制御装置には、発電、発電調相、揚水、及び揚水調相の各運転モードでステップ制御を適用して保守性を向上させた。

監視制御装置の工場における機能検証試験には、水力発電所の制御装置として初めて仮想空間シミュレータを適用した。仮想空間シミュレータ環境内に、主機3台と所内共通機器のソフトウェアによるシミュレータを構築し、各機器の入出力の端子台番号に相当する入出力線番をシミュレータ内で接続することで、起動・停止動作、及び各運転モードの確認を行うことができる。また、将来増設される2号機及び3号機を仮想空間内に構築することで、各号機との取合いを確認し、同期始動やサイリスタ始動などの検証を実施した。仮想空間シミュレータの構成を図10に示す。

仮想空間シミュレータで機能検証を行うことで、従来はハードウェアで構築していた模擬装置を省略でき、更にハードウェア試験と制御機能試験を並行して実施でき、工場試験の合理化と制御ソフトウェアの完成度向上を実現した。

8 特殊運転機能

京極発電所の可変速機の特筆すべき特長として、以下の機能がある。

8.1 フライホイール運転²⁾

フライホイール運転を行うシステムとしては、現在、沖縄電力(株)中城湾変電所の周波数調整装置があるが、京極発電所では、可変速揚水発電システムとして初めて、ランナ及び回転子の回転エネルギーを利用して充放電するフライホイール運転機能を装備した。

フライホイール機能とは、系統周波数が低下した場合、回転エネルギーを電気エネルギーに変換して放出し(この結果、回

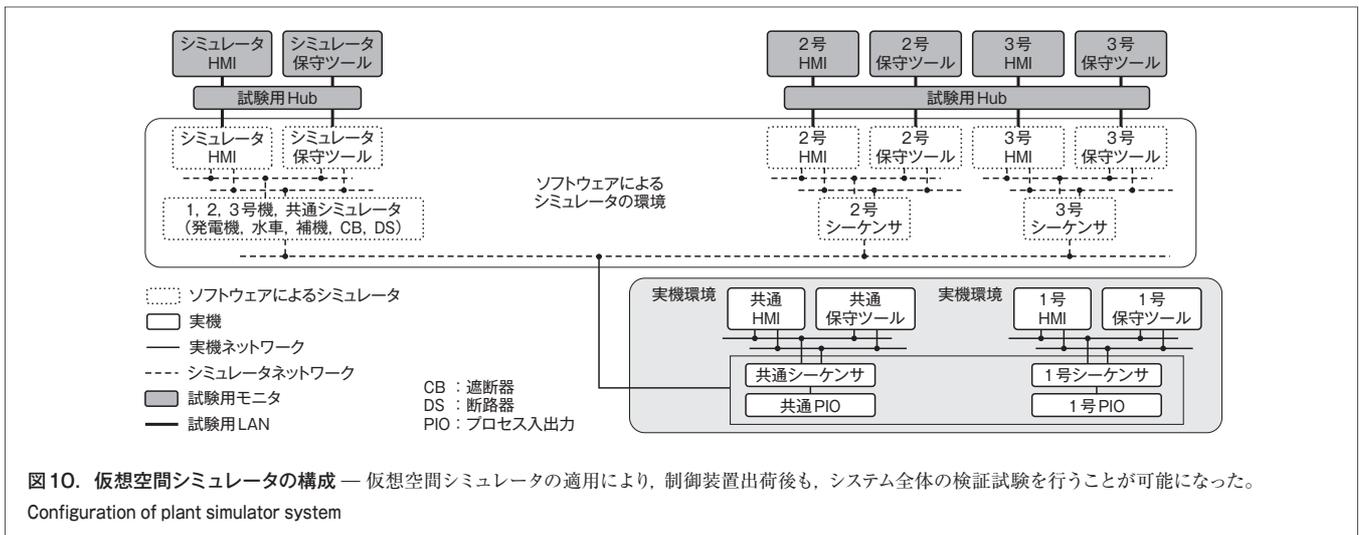
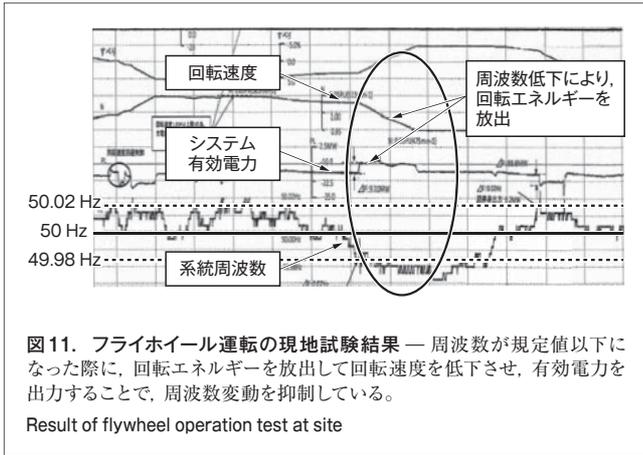


図10. 仮想空間シミュレータの構成 — 仮想空間シミュレータの適用により、制御装置出荷後も、システム全体の検証試験を行うことが可能になった。

Configuration of plant simulator system



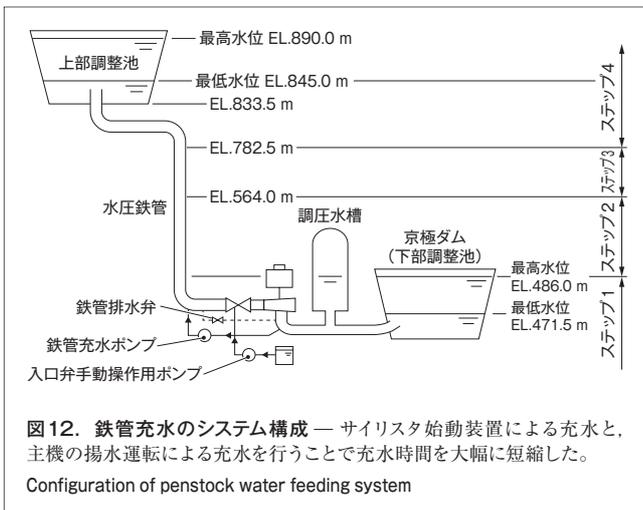
転速度が低下する)、周波数が上昇した場合、電気エネルギーを回転エネルギーに変換して蓄え(この結果、回転速度が増加する)、系統周波数変動を抑制するものである。

京極発電所では、フライホイール運転時は、定格速度の103%に相当する 515 min^{-1} で待機運転を行い、周波数偏差が発生した際に、主機の回転速度を103%から95%まで低下させたり103%から105%まで増加させたりして、20 MWの回転エネルギーの放出又は蓄積を行い、周波数の変動を抑制する。現地試験の結果、周波数低下により回転エネルギーを放出して周波数変動を抑制できることを確認した(図11)。

8.2 サイリスタ始動装置による鉄管充水運転

通常、鉄管を充水する場合、充水ポンプを使用するが、京極発電所では充水時間を短縮するために、次のステップで充水を行った(図12)。

- ステップ1 ガイドベーン及び入口弁を開くことにより下ダム水位まで充水
- ステップ2 サイリスタ始動装置による充水
- ステップ3 鉄管充水ポンプによる充水
- ステップ4 主機の揚水運転による充水



ステップ2 (EL.486 m) からステップ4 (EL.845 m) までの充水は、通常の充水ポンプだけでは33日程度が必要であったが、この運転を行うことで15時間程度に短縮した。

これらのステップの中で、ステップ2は、共通設備として納入したサイリスタ始動装置を使用してポンプ運転することにより充水を行うものである。

揚水運転を行うために、サイリスタ始動装置でポンプ水車を揚水起動させる際は、通常、ランナ周りの水面押下げを行い、空気中でランナを回転させて損失を低減させている。しかし、鉄管充水運転を行う場合、ランナが水中にある状態でサイリスタ始動装置によってランナを回転させる、水中起動を行う必要がある。今回、当社として初めて水中起動を行い、サイリスタ始動装置でEL.486 mからEL.564 mまでポンプ運転で充水できることを確認した。

9 あとがき

1号可変速機の運転開始により、揚水運転時の入力調整による系統安定化だけでなく、フライホイール運転による周波数変動抑制にも貢献できるシステムを実現した。

現在、2号可変速機の現地試験が進められており、2015年に営業運転を開始することで、可変速機2台運転によるいっそうの系統安定化が期待されている。

当社は、京極発電所で得た経験を生かして、更に顧客満足度の高い可変速揚水発電システムの適用拡大を進めていく。

文 献

- (1) 楠 清志 他. 可変速揚水発電・水力発電システムを支えるパワーエレクトロニクス技術. 東芝レビュー. 69, 4, 2014, p.12-15.
- (2) 塚田龍也. 可変速フライホイール発電システムの実用化. 電気評論. 82, 3, 1997, p.38-42.



田中 健弘 TANAKA Takehiro

電力システム社 火力・水力事業部 水カプラント技術部主務。
水力発電所のプラントエンジニアリング業務に従事。
Thermal & Hydro Power Systems & Services Div.



坂本 茂 SAKAMOTO Shigeru

電力システム社 府中電力システム工場 発電システム制御部。
水力発電所の制御機器設計に従事。
Fuchu Operations - Power Systems



塩崎 裕一 SHIOZAKI Yuichi

電力システム社 府中電力システム工場 発電システム制御部
主務。可変速揚水ほかパワーエレクトロニクス機器の制御装置の開発設計に従事。電気学会会員。
Fuchu Operations - Power Systems