

関西電力(株) 出し平発電所 可変速小水力発電設備の運転開始

Commencement of Commercial Operation of Small-Scale Adjustable-Speed Hydropower Generation System at Dashidaira Power Station of The Kansai Electric Power Co., Inc.

松村 彰子

渡辺 哲毅

山下 吉則

■ MATSUMURA Akiko

■ WATANABE Noritaka

■ YAMASHITA Yoshinori

可変速発電システムを適用した関西電力(株) 出し平発電所が2015年11月に営業運転を開始した。出し平発電所は河川環境維持のためのダム放流水を利用した発電設備で、落差と流量の変化幅が大きいため、回転速度が一定な従来の水車では全ての運転条件で安定した運転をすることが難しいという問題があった。

東芝は、発電機の出力端に周波数変換器を設け、広範囲に回転速度を変えることができる小水力発電所用の可変速発電システムを開発し、全運転範囲での安定した運転を実現した。このシステムを適用することで、これまで発電に利用されていなかった水資源の有効利用が期待できる。

The Dashidaira Power Station of The Kansai Electric Power Co., Inc., equipped with an adjustable-speed hydropower generation system, entered commercial operation in November 2015. The Dashidaira Power Station utilizes water discharged from its dam in such a way that a good environment is maintained for the river on which it is located. However, the large variations in the head and flow rate of the water would impede stable operation under certain operating conditions in the case of a conventional hydraulic turbine with a fixed rotation speed.

To resolve this issue, Toshiba developed an adjustable-speed system for small-scale hydroelectric power generation plants and delivered it to the Dashidaira Power Station. This system makes stable operation possible over the full range of operations by allowing the rotation speed of the hydraulic turbine to be adjusted over a wide range through the connection of a frequency converter to the output terminal of the generator. As a result, the power station efficiently utilizes water resources that have not been effectively used up to now.

1 まえがき

近年、再生可能エネルギーの利用が進められており、固定価格買取制度 (FIT: Feed-in Tariff) の導入などにより未利用だった水資源を発電に利用する取組みが見直されてきている。その中で河川維持放流水は、既設ダムの設備を流用するため導入障壁が低い反面、流量や落差の変動が大きく、水車の特性上運転が困難なケースがあった。

これに対し東芝は、水車を最適回転速度で運転することで落差変動に対応して運転特性を改善できる、小水力発電所用の可変速発電システムを開発し^{(1), (2)}、これを適用した関西電力(株) 出し平発電所が2015年11月に運転を開始した。

ここでは、小水力発電所用の可変速発電システムの概要と、性能確認試験結果について述べる。

2 出し平発電所の概要

出し平発電所は、富山県黒部市黒部峡谷の中腹にある出し平ダムの直下に位置する。下流域に必要な水量を確保するために、出し平ダムから放流している維持放流水を利用した発電所 (図1) であり、定格は以下のとおりである。

- (1) 最大発電所出力: 520 kW
- (2) 使用流量: 1.72 m³/s 又は 0.51 m³/s (最大流量: 1.76 m³/s)



図1. 出し平ダムの全景 — 既存の出し平ダムの維持放流水管を分岐して、発電設備を新たに設置した。

Panoramic view of Dashidaira Dam

- (3) 有効落差: 24.29 ~ 37.29 m (最大流量時)

黒部峡谷鉄道(株)のトロッキョ電車が唯一のアクセス手段であり、建設資材もこの鉄道を利用して輸送したが、一般の車両に比べると小さいため、寸法や重量で厳しい制限を受けた。また、冬季は積雪により運行ができず、輸送時期についても制限があった。

3 可変速発電システムの概要

3.1 可変速化による水車の運転改善

維持放流量は、季節や時間ごとに決められており、出し平発電所の場合、発電に利用できる水量は $1.72 \text{ m}^3/\text{s}$ (100%)と $0.51 \text{ m}^3/\text{s}$ (30%)の2パターンである。また、落差はダム水位により左右され、最高落差 37.29 m (100%)から最低落差 24.29 m (65%)まで、一般のダム式水力発電所と比較すると大きく変動する。このように落差と流量の変動が大きい場合、一定速度で回転する従来の発電設備では、高落差でのキャビテーション発生と、低落差や低流量時での翼間渦発生によって振動や騒音が生じてしまう(図2)。両方を回避しようとする、発電に使用できる落差と流量の範囲が限定されるため、発電できる期間が短くなり、有効にエネルギーを回収できないという問題があった。

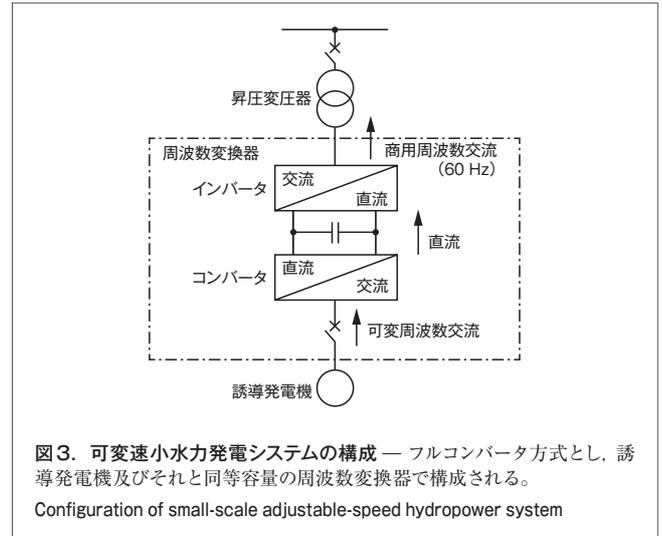
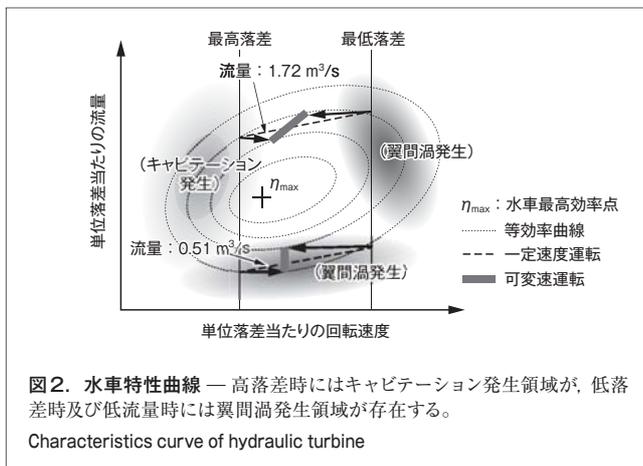
発電機を可変速化することで、水車の回転速度を変化させて良好な運転状態にできるため、水車効率が向上するとともに、運転可能な範囲も拡大し、発電電力量を増大することができる。

3.2 機器構成

従来の可変速揚水発電設備に採用されている二次励磁方式は、発電機の回転子に変換器を接続し、二次励磁電流を制御して可変速運転を行う。このため、発電機容量に対して変換器容量を小さくできるが、機器構成や制御が複雑になり、小水力発電設備としてはメリットが小さい。そこで、機器構成が簡素で制御も容易なフルコンバータ方式を採用した(図3)。誘導発電機の出力側に、それと同等容量の周波数変換器を接続し、誘導発電機の変換周波数出力を商用周波数(60 Hz)の電力に変換している。

3.3 各機器の選定

前述したとおり、輸送寸法・重量の制限は非常に厳しく、また、発電設備の設置できるスペースも限られていた。更に、冬季は発電所へのアクセスが困難である。各機器の仕様は、これらのことを考慮し、保守の軽減及び装置のコンパクト化を重



視して決定した。

- (1) 水車 運転特性や、経済性、保守性を考慮して、固定羽根で横軸のフランシス水車を採用した。ガイドベーン及び入口弁は補機が少ない電動式を採用し、保守の軽減を図った。
- (2) 発電機 励磁装置が不要で、回転子構造も簡素で堅ろうなため信頼性が高く価格も安い、かご形誘導発電機を選定した。また、フルコンバータシステムと組み合わせ、一般の誘導発電機で必要になる始動用の限流リアクトルや力率改善用コンデンサが不要な構成とした。
- (3) 周波数変換器 発電機からの周波数 $35 \sim 60 \text{ Hz}$ の交流電力をコンバータで直流に変換し、インバータで系統電圧の商用周波数に逆変換して出力する。インバータ及びコンバータは電圧型三相-2レベルインバータの構成で、直流コンデンサも含めてユニット化されている。スイッチング素子には直接水冷IGBT(絶縁ゲートバイポーラトランジスタ)素子を4並列で適用し、冷却効率を高めることで装置の小型化を図った。
- (4) 周波数変換器用冷却装置 閉鎖循環の水冷式で、盤の外部に循環水を冷却するためのラジエータ式空冷冷却装置を設けた。設定温度に対し、ファンのオン/オフ制御で温度管理しており、ダクトを用いて発電所の建屋外へ排熱する。また、冬場の外気温が氷点下となるため、冷却媒体に不凍液を使用した。
- (5) 昇圧変圧器 周波数変換器からの出力を、 540 V から系統電圧の 3.3 kV に昇圧して系統へ接続するもので、安価で保守が簡易なモールド乾式タイプを選定した。
- (6) 制御装置 制御装置は、シーケンス制御、定流量制御、最適速度制御、及びスケジュール運転の機能を備え、一体化した装置とした。また、定速度の発電専用機に設けていた調速制御装置、自動電圧調整装置、及び自動同

表1. 主要機器の要項
Ratings of main components

機器	項目	要項
水車	水車型式	横軸フランシス水車
	水車出力	570 kW
	有効落差	24.29 ~ 37.29 m
	流量	1.72 及び 0.51 m ³ /s
発電機	発電機型式	横軸三相かご形誘導発電機
	発電機出力	540 kW
	端子電圧	540 V
	極数	10極
	回転速度範囲	430 ~ 720 min ⁻¹
周波数変換器	変換器容量	520 kW
	力率	0.85 (系統側)
	端子電圧	540 V
	スイッチング周波数	系統側 : 4 kHz 発電機側 : 2 kHz

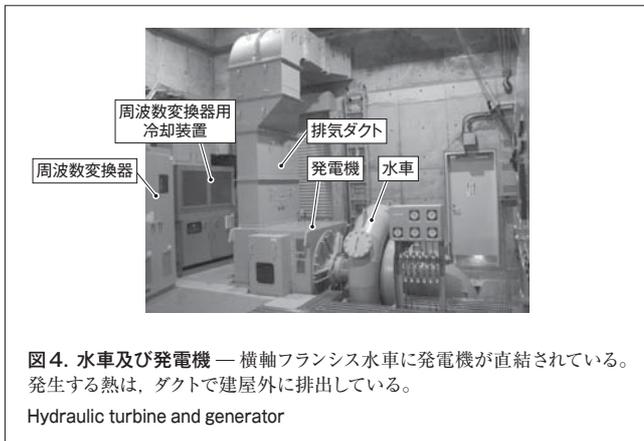


図4. 水車及び発電機 — 横軸フランシス水車に発電機が直結されている。発生する熱は、ダクトで建屋外に排出している。
Hydraulic turbine and generator

期装置は不要となった。

これら主要機器の要項を表1に、発電所内に設置した機器を図4に示す。

4 可変速制御システム

4.1 制御システムの構成

水力発電所では発電出力を制御対象とするのが一般的であるが、維持放流水を発電に利用する場合の第一の責務は、“規定された放流量を維持すること”であるため、制御の対象は流量とし、発電出力は従属値とした。そのため、落差の変化によらずに流量を一定に保ち、可変速運転を実現する制御システムを開発した(図5)。

ダム水位と水車のガイドベーン開度から求まる流量の関数を制御装置内に記憶させておき、実流量を計算で求める。そして、これが規定の放流量となるようにガイドベーン開度を制御することで、流量を直接的に測定することなく、維持放流量を保ちながら可変速運転を行うことができる。また同様に、

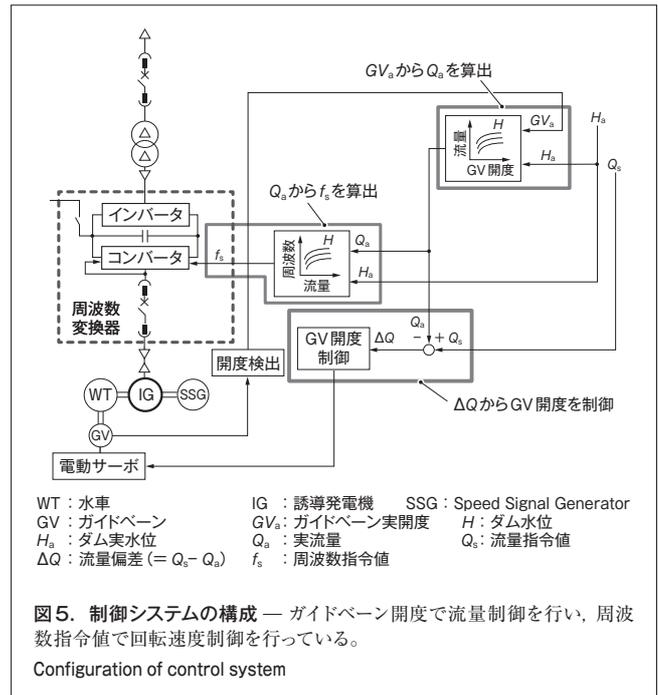


図5. 制御システムの構成 — ガイドベーン開度で流量制御を行い、周波数指令値で回転速度制御を行っている。

Configuration of control system

流量とダム水位から求まる水車特性(水車の最適な回転速度)を制御装置内に記憶させておき、コンバータに周波数指令を出して、回転速度を制御している。周波数変換器のコンバータ出力電圧は、電圧と周波数の比を一定に保ちながら周波数を変化させるV/f一定制御により決定される。

4.2 誘導発電機の回転速度制御

誘導発電機のトルクと滑りの関係を図6に示す。発電時は、水車の回転速度よりもマイナス方向の滑り分だけ低い周波数でコンバータから誘導発電機に励磁をかける。水車からの入力が増えて回転速度が上昇すると、滑りの大きさも増え、発電量が増加するとともに回転速度の上昇を抑制するようにトルクが作用する。そのため、滑りとトルクがバランスした回転速度で安定運転ができる。

4.3 起動時の制御

起動時は、入口弁とガイドベーンを開ける前に並列用遮断

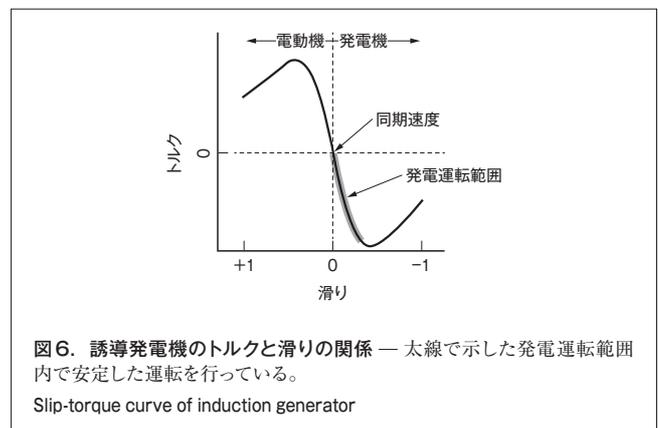
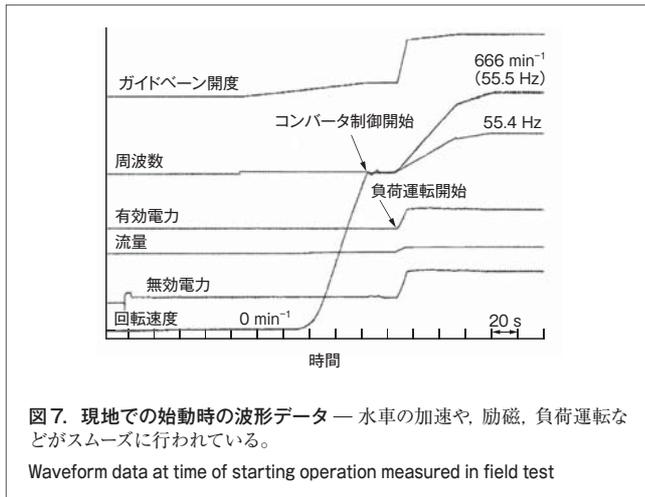


図6. 誘導発電機のトルクと滑りの関係 — 太線で示した発電運転範囲内で安定した運転を行っている。
Slip-torque curve of induction generator



器を投入し、周波数変換器の受電と直流リンクコンデンサの電圧維持を行う。このため、同期装置は不要となる。系統へ電力を出力する際は、周波数変換器のインバータが系統の周波数及び電圧に出力を合わせるため、常に系統と同期が取れた状態にできる。

5 試験結果

現地試験では、周波数変換器のコンバータ電圧確立、励磁、及び同期の各ステップを試験した後、全体のシステム試験を行った。

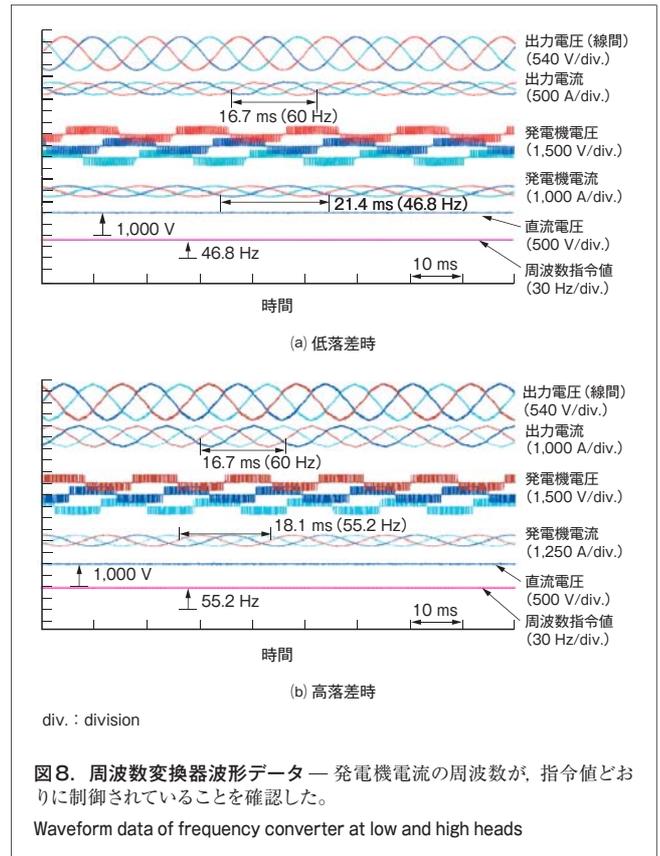
今回開発した、始動から負荷運転へ移行する制御が設計どおりであることを確認した。一例として、始動時の波形を図7に示す。水車回転速度が設定速度まで達すると、周波数変換器はコンバータの制御を開始する。コンバータは水車回転速度と同期するように周波数を上昇させた後、V/f制御の目標値まで相電圧を上昇させる。相電圧が確立した後に負荷運転を開始し、ガイドベーン開度を制御して規定の放流量となるように流量を維持するとともに、コンバータを制御することで、周波数指令値となるように水車及び発電機の回転速度を制御している。

また、図8に、低落差(338 kW出力)時と高落差(510 kW出力)時の周波数変換器の波形を示す。低落差及び高落差時のコンバータ周波数は、それぞれ46.8 Hz及び55.2 Hzであり、周波数変換器によって落差に応じた水車の最適回転数での運転を実現している。

このように、開発した可変速システムにより、1.72 m³/s及び0.51 m³/sのいずれの流量でも、最高落差から最低落差まで水車が安定して運転できることを確認した。

6 あとがき

当社は、小水力発電所用の可変速発電システムを開発した。



また、これを初適用した出し平発電所の運転開始により、維持放流水のような従来発電に利用されていなかった水を有効利用できる新たな可能性を示した。ここで得た経験を生かし、開発したシステムの適用拡大を進めていく。

文献

- 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.
- 田村安志 他. 小さな水資源も有効活用する中小水力発電技術. 東芝レビュー. 70, 1, 2015, p.20-23.



松村 彰子 MATSUMURA Akiko

エネルギーシステムソリューション社 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.



渡辺 哲毅 WATANABE Noritaka

東芝システムテクノロジー(株) システムソリューション第二部 発電制御システム第二担当。水力発電制御装置の設計に従事。
Toshiba System Technology Corp.



山下 吉則 YAMASHITA Yoshinori

東芝プラントシステム(株) 電力プラント事業部 水力機器システム部参事。水車の設計に従事。
Toshiba Plant Systems & Services Corp.