

東京電力(株) 葛野川発電所4号可変速機の運転開始

Commencement of Commercial Operation of Kazunogawa Hydroelectric Power Station Unit 4 of Tokyo Electric Power Co., Inc. Employing World's Largest Capacity Adjustable-Speed System

藤田 崇 東條 裕宇 小山 創
 ■FUJITA Takashi ■TOJO Hirotaka ■KOYAMA Hajime

東京電力(株) 葛野川発電所4号機の変速揚水発電システムは、2014年6月9日に営業運転を開始した。

4号機の工事は、2002年にいったん中断されていたが、東日本大震災による電力不足を受けて急ぎ再開され、東芝は、約3年の短納期で製作及び工事を完遂した。4号機は、二次励磁装置にIEGT (Injection Enhanced Gate Transistor) 変換器を初めて^(注1)採用した世界最高^(注2)揚程のポンプ水車を持つ世界最大^(注3)容量の可変速揚水機である。定速揚水発電システムと同様の大規模電力貯蔵機能に加え、系統安定及び水資源の有効利用に貢献できる。

Unit 4 of the Kazunogawa Hydroelectric Power Station of Tokyo Electric Power Co., Inc., located in the cities of Otsuki in Yamanashi Prefecture, started commercial operation on June 9, 2014. Although construction work on Unit 4 was suspended in 2002, it was urgently restarted as a countermeasure against the shortage of electricity following the Great East Japan Earthquake.

Toshiba successfully completed the manufacturing of the equipment and construction work within the short period of about three years. Unit 4 is an adjustable-speed pumped-storage hydroelectric power system with the world's largest capacity employing a pump turbine with the world's highest pump head and an AC excitation system using an injection enhanced gate transistor (IEGT) inverter and converter. It is expected to contribute to the stabilization of electricity generation and the effective utilization of hydropower resources, while providing a large-capacity storage function equivalent to that of constant-speed systems.

1 まえがき

東芝は、可変速揚水発電システム(以下、可変速機と呼ぶ)を1990年に世界で初めて^(注4)東京電力(株) 矢木沢発電所2号機で実用化してから⁽¹⁾、可変速発電電動機の大容量化や、二次励磁装置の大容量化、高速制御などを進めてきた。東京電力(株) 葛野川発電所4号機は、二次励磁装置にIEGT変換器を初めて採用した世界最高揚程のポンプ水車を持つ世界最大容量の可変速揚水発電システムであり、2014年6月9日に営業運転を開始した。

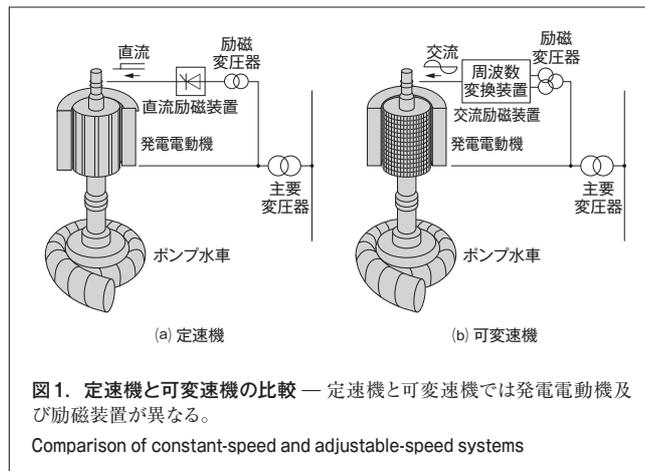
4号機の工事は、2002年にいったん中断されていたが、2011年の東日本大震災の影響によって生じた電力不足を受けて急ぎ再開されることになり、当社は、約3年の短納期で製作及び工事を完遂した。

ここでは、4号機で採用した可変速機の特長や4号機の概要及び特長などを述べる。

2 可変速機の原理及び特長

4号機で採用した可変速機の基本的な仕組みや特長について以下に述べる。

(注1) 2014年6月時点、当社調べ。
 (注2) 2014年12月現在、単段ポンプ水車として、当社調べ。
 (注3) 2014年12月現在、可変速揚水発電システムとして、当社調べ。
 (注4) 1990年12月時点、当社調べ。

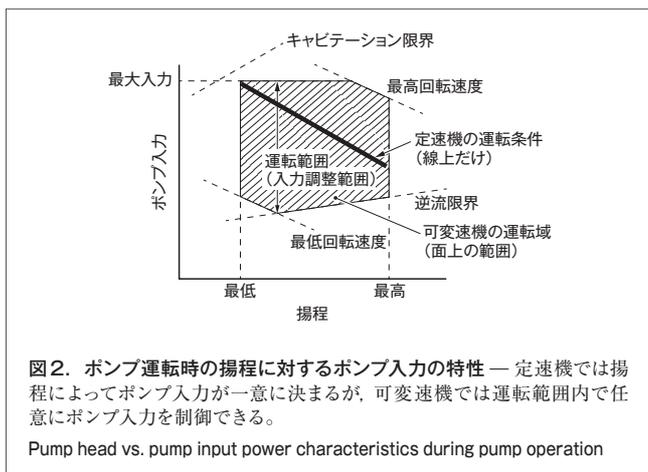


2.1 可変速機の原理

可変速機では、定速の揚水発電で用いている突極形同期発電電動機の代わりに二重給電発電電動機(Double Fed Generator Motor: DFGM)を用い、励磁装置も直流励磁の代わりに交流励磁を用いる。定速の揚水発電システム(以下、定速機と呼ぶ)と可変速機の比較を図1に示す。

交流励磁では、励磁電流の大きさだけでなく位相も直接制御できるため、内部操作角を高速に変化させることで、有効電力及び無効電力を高速に制御できる。

ポンプ水車の入出力と発電電動機の入出力との差は、ポンプ水車及び発電電動機の回転体の持つ回転エネルギーの増



減として現れ、結果として回転速度が変化する。

定速機では、回転速度が変化すると脱調して運転継続ができないが、可変速機では、式(1)のように、商用周波数である固定子磁束の周波数(例： $N_1=50$ Hz)と、回転子の回転周波数(例： $N_m=48$ Hz)と交流励磁周波数(例： $N_2=2$ Hz)の和である回転子磁束の周波数が一致するように制御することで、任意の回転速度で運転継続できる⁽²⁾。

$$N_1 = N_m + N_2 \quad (1)$$

2.2 可変速機の特長

可変速機では、従来の定速機と同様の大規模電力貯蔵設備としての機能に加え、以下の特長がある。

2.2.1 揚水運転時の入力調整運転 ポンプ運転時の揚程に対するポンプ入力の特長を図2に示す。定速機は図2の線上で運転するため、揚程によりポンプ入力が決まり、入力電力を変えられなかった。一方、可変速機は回転速度を変えることで、図2の斜線の範囲でポンプ入力を調整できるため、揚水運転時も系統安定に寄与する。

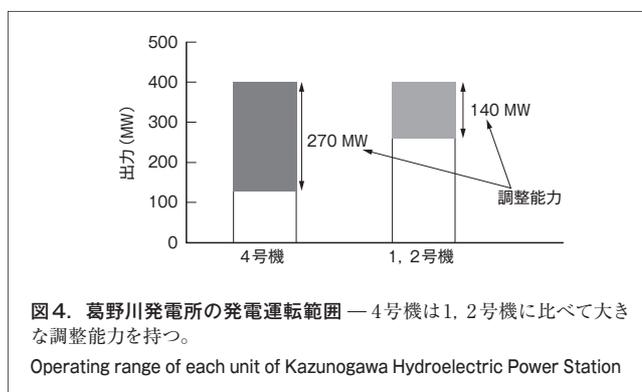
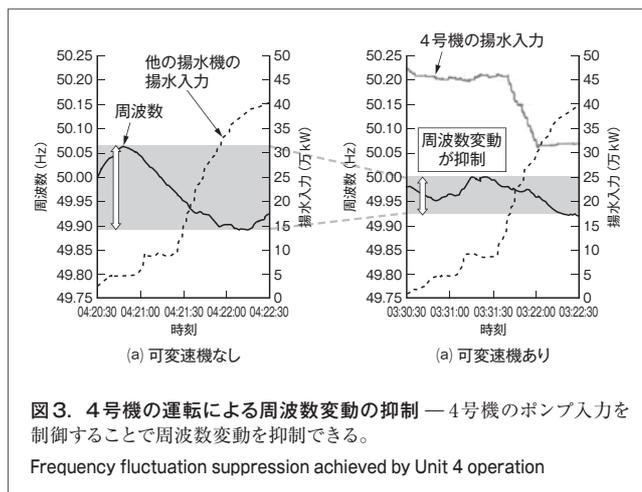
2.2.2 高速応答性 定速機では水車の流量を調整し、水車入力の増減で有効電力を制御することしかできなかったが、可変速機では水車入力の制御以外に、2.1節で述べたように、励磁装置で有効電力の出力を高速に制御できる。したがって、揚水運転時も同様の高速応答が可能である。

2.2.3 発電運転時の利点 可変速機は、条件に応じて水車に適した回転速度で運転できるので、以下の利点がある。

- (1) 発電運転時の最低出力の低減
- (2) 発電運転時の水車効率の向上
- (3) 水車に損傷を与えるキャピテーションやホワールなどの低減による、運転可能な落差及び出力調整範囲の拡大

3 葛野川発電所の概要

葛野川発電所は、東京都心から80 kmほどの山梨県大月市



に位置し、4台のポンプ水車及び発電電動機が設置される計画で、全てが完成すれば総出力1,600 MWとなる大規模な揚水発電所である。1, 2号機は他社製の定速機で、それぞれ1999年及び2000年に運用を開始しており、4号機は3台目で、当社製可変速機である。また、残り1台も可変速機を当社が納入する予定で、2024年以降の運用開始を予定している。

3.1 揚水運転時の4号機の効果

2.2.1項で述べたように、可変速機は揚水運転時も入力電力を調整できるので、図3に示すように、4号機の運転中は他揚水機での始動・停止時の周波数変動を抑制できていることがわかる。特に、揚水運転を主に行う夜間では、系統負荷が軽いので、系統安定により大きく貢献できる。

3.2 発電運転時の4号機の効果

発電運転時の最低出力は、図4に示すとおり、4号機が130 MW(定格の32.5%)であり、定速機2台分とほぼ同等の270 MWにすることが可能となった。このため、同じ調整能力を得るために必要な運転台数を減らすことができる。

4 4号機の構成と特長

4号機の主要機器の定格を以下に示す。ポンプ水車は、単

段ポンプ水車として世界最高揚程であり、また発電電動機は、可変速機として世界最大容量である。

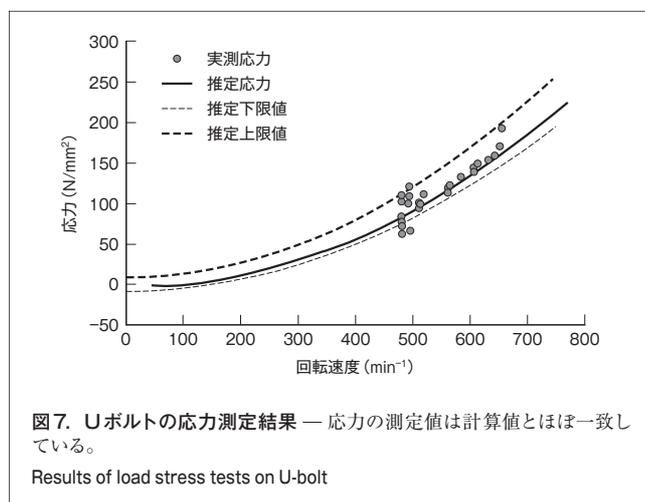
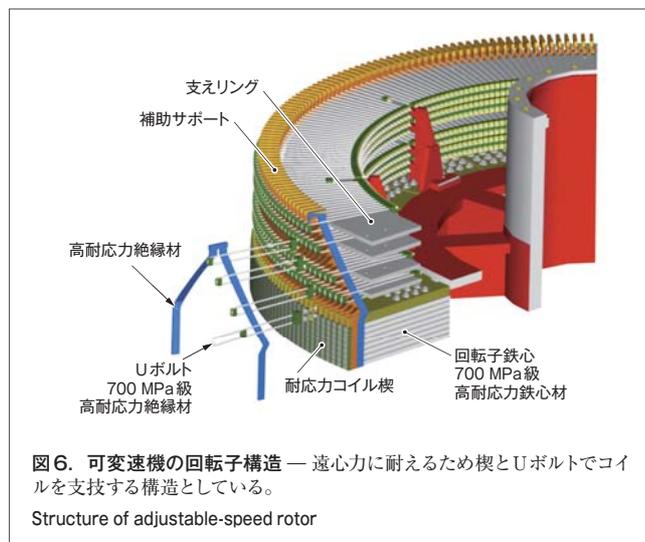
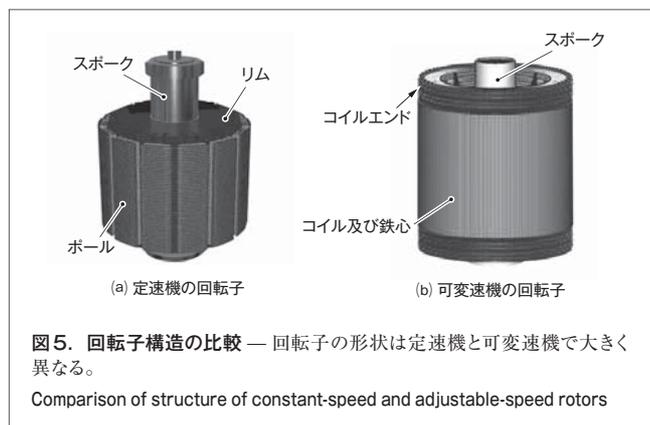
- (1) ポンプ水車
 - (a) 有効落差 : 最高 728 m, 基準 714 m
 - (b) 全揚程 : 最高 785 m, 最低 744 m
 - (c) 定格出力 : 412 MW
 - (d) 最大軸入力 : 460 MW
 - (e) 回転速度 : 480 ~ 520 min⁻¹
- (2) 発電電動機
 - (a) 定格容量 (発電機) : 475 MVA
 - (b) 定格容量 (電動機) : 460 MW
 - (c) 定格周波数 : 50 Hz
 - (d) 定格力率 (発電機) : 0.85
 - (e) 定格力率 (電動機) : 1.0
- (3) インバータ
 - (a) 定格容量 : 36.5 MVA
 - (b) 定格電圧 : 4.04 kV
 - (c) 定格電流 : 5.21 kA
 - (d) 周波数可変幅 : -2.0 ~ +2.0 Hz

4.1 発電電動機の構造と特長

従来の定速機では発電電動機の回転子に直流を流し、磁極の位置も決まっているため、図5(a)のように、回転子を突極機の構造にできるが、可変速機では回転子巻線に交流を流して回転磁界を発生させるため、図5(b)のように、回転子を円筒形状にしている。

いずれの回転子にも大きな遠心力が掛かるため、定速機では、コイルを磁極鉄心で支持している。一方、可変速機では、鉄心部分のコイルは楔(くさび)を介して鉄心で支持するが、鉄心外のコイルエンド部は遠心力に耐えるような支持構造が必要となる。

当社は、図6のようにコイルエンド部をUボルトで支持する構造を適用している。この構造のメリットは、現地組立時に大がかりな組立装置が不要となり、組立期間も短く、組立後の調整も容易になることである。



Uボルト方式は20年以上の運転実績があるが、4号機は回転速度が500 min⁻¹と高速で回転子直径も大きいので、遠心力は当社の可変速機としては最大となる。そこで、回転子に測定機器を取り付けて運転中のUボルト各部位の応力を測定し、設計の妥当性を確認した(図7)。

また、スラスト軸受静止板の滑り面には、従来の金属製に比べ、摩擦係数が約1/3、摩耗量が約1/50のPTFE(四フッ化エチレン樹脂)を主成分とした樹脂軸受を採用した(図8)。ポンプ水車は、水車専用機と異なり両方向に回転するため、軸受の技術的難易度が高いが、その中でも世界最大容量級である葛野川機でも安定した性能を実現した。

4.2 ポンプ水車の特長

ポンプ水車は世界最高揚程であり、図9に示すように、過去の高落差ポンプ水車と比べても水圧脈動が少なく、結果として騒音や振動の少ない良好な運転ができることを確認した。

4.3 二次励磁装置の構成と特長

可変速機と従来の定速機との大きな違いとして二次励磁装



図8. 樹脂製のスラスト軸受静止板 — PTFEを主成分とした樹脂で、従来の金属製に比べ摩擦係数は約1/3、摩耗量は約1/50である。
Nonmetallic thrust bearing pad

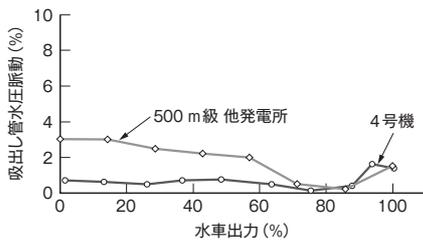
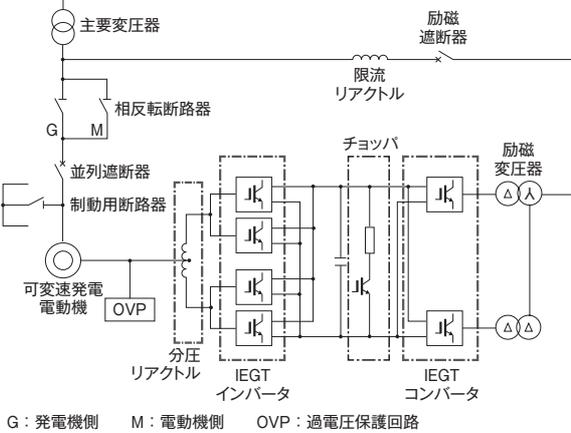


図9. 上部吸出し管の水圧脈動 — 過去の高落差ポンプ水車と比べて水圧脈動が少ない。
Pressure fluctuation of upper draft tubes



置がある。4号機では、図10の単線結線図に示すように、二次励磁装置にIEGT変換器を初めて適用した⁽³⁾。更に、変換器出力間に分圧リアクトルを設けて多段化し、高調波を低減した。

5 あとがき

世界最大容量の可変速機である葛野川発電所4号機(図11)について述べた。

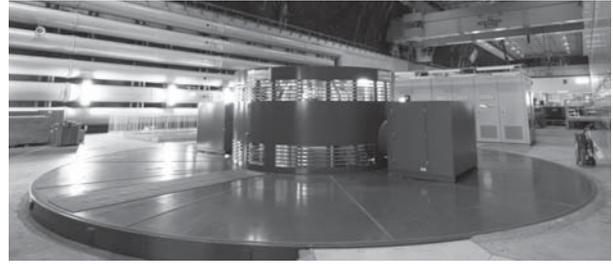


図11. 葛野川発電所の全景 — 葛野川発電所は地下空洞内に設置されている。手前で見えているのが4号機である。
Kazunogawa Hydroelectric Power Station

当社はkW級～数百MW級の可変速化技術を持っており、多種多様な揚水・水力発電システムの可変速化に対応できる。

揚水・水力発電システムの可変速化により、揚水時の入力調整や、高速応答、高効率運転、運転範囲の拡大などが可能になる。揚水時の入力調整及び高速応答は再生可能エネルギーの出力変動対策に寄与し、高効率運転及び運転範囲の拡大は水力資源の有効利用に貢献する。

海外でも再生可能エネルギーの普及により可変速機の建設や建設計画が増加している。可変速機の20年以上の運転実績と、最大容量となる葛野川発電所4号機の実績を踏まえ、海外にも適用拡大を図っていく。

文献

- (1) 向井一馬 他. 可変速システムの電力分野への適用拡大. 東芝レビュー. 51, 12, 1996, p.59-64.
- (2) 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.
- (3) 柏木航平 他. “大容量可変速揚水発電二次励磁装置の開発”. 平成26年電気学会 電力技術・電力系統技術合同研究会. 堺, 2014-09, 電気学会, 2014, PE-14-121, PSE-14-121.



藤田 崇 FUJITA Takashi

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.



東條 裕宇 TOJO Hiroto

電力システム社 京浜事業所 発電機部主務。
水車発電機の設計に従事。
Keihin Product Operations



小山 創 KOYAMA Hajime

電力システム社 京浜事業所 水力機器部。
水車の設計に従事。
Keihin Product Operations