

可変速揚水発電システムの性能向上とその活用

Technologies to Improve Adjustable-Speed Pumped-Storage Hydropower System Performance

金田 大成 KANEDA Hironari 利光 智圭 TOSHIMITSU Tomoyoshi 柏木 航平 KASHIWAGI Kohei

可変速揚水発電システムは、電力貯蔵機能に加え、電力系統の優れた調整力が特長である。我が国の電源構成で、出力の変動する再生可能エネルギーが増加する大きな変化に伴い、その価値がますます高まっている。

東芝エネルギーシステムズ(株)は、2023年10月に電源開発(株)奥清津第二発電所2号機の可変速揚水発電システムを更新した。新たな技術で、二次励磁装置用変換器の損失を約26%、体積を約37%小さくし、起動も高速化した。システムは、電源構成に応じて柔軟に運用され、電力系統の需給バランス調整に貢献している。

Adjustable-speed pumped-storage hydropower systems, which can store electricity and adjust electric power system fluctuations, have become increasingly important due to ongoing changes in Japanese electricity markets triggered by the expansion of renewable energy systems necessary for adjusting output power fluctuations.

Toshiba Energy Systems & Solutions Corporation completed the replacement of the adjustable-speed pumped-storage system for Unit 2 at the Electric Power Development Co., Ltd. Okukiyotsu No. 2 Power Station in October 2023. The new secondary excitation device power converter reduces power loss by about 26%, volume by about 37%, and shortens the startup time. The new system helps adjust the electricity supply and demand balance in electric power systems by flexibly operating in accordance with combined power sources.

1. まえがき

揚水発電システムは、従来、電力需要の少ない夜間に、ベース電源である原子力発電や火力発電の余剰電力を利用して水をくみ上げることで電力を貯蔵し、電力需要が多くなる昼間に水を落ささせて発電するというように、主に昼夜の電力需給を調整するピーク負荷運用が行われてきた。原子力などの一定出力で運転される設備が増えてくると、夜間などの需要が少ない時間の調整力が求められるようになった。

そこで、東芝エネルギーシステムズ(株)は、揚水入力を変えられる可変速揚水発電システム(以下、可変速機と略記)を1990年に世界で初めて^(注1)実用化した。

2011年の東日本大震災以降、我が国の電源構成は大きく変わり、太陽光発電や風力発電など自然環境により出力が変動する再生可能エネルギー(以下、変動再エネと略記)の導入が増えたことで、運用方法が変化してきている。

奥清津第二発電所2号可変速機は、1996年の運転開始から25年以上が経過し、二次励磁装置用変換器(以下、変換器と略記)のGTO(Gate Turn-off Thyristor)素子が廃型となっており、保守が困難になるとともに、老朽化に伴う計画外停止が増加していた。そこで、信頼性の回復や、保守性の向上を目的として、変換器と制御装置の更新が行

(注1) 1990年12月時点、当社調べ。

われ、当社が納入し、2023年10月に運転が再開された。

ここでは、可変速機の原理と特長に触れた後、更新後の奥清津第二発電所2号可変速機の特長、及び電源構成の変化に伴い運用が変化した事例について述べる。

2. 可変速機の原理と特長

2.1 可変速機の原理

図1に、一定回転速度で運転する揚水発電システム(以下、定速機と略記)と可変速機の、構造を比較して示す。定速機は、発電電動機に突極形同期機、励磁装置に直流励磁を用いる。可変速機は、発電電動機に二重給電交流機、励磁装置に交流励磁を用いる⁽¹⁾。

定速機は、系統周波数である固定子磁束の周波数と、回転体の回転周波数が一致している必要があり、回転速度を変えられない。

可変速機は、系統周波数である固定子磁束の周波数(例:50 Hz)と、回転体の回転周波数(例:48 Hz)に交流波数(例:2 Hz)を加えた回転子磁束の周波数が、系統周波数と一致するように制御することで、規定の速度範囲において任意の回転速度で運転できる。

2.2 可変速機の特長

可変速機には、定速機と同じ電力貯蔵機能に加え、揚水運転時と発電運転時で以下の特長がある⁽²⁾。

2.2.1 揚水運転時の特長

図2(a)に、揚水運転時の運転範囲を、定速機と比較して示す。定速機は、同期速度での運転となるため、揚程が決まると入力が決まる。一方、可変速機は、同じ揚程でも回転速度を変化させることにより入力を変化させられる。このように揚水運転において入力調整が可能なことが可変速機の最大の利点である。

2.2.2 発電運転時の特長

図2(b)に、発電運転時の運転範囲を、定速機と比較して示す。定速機では、ガイドベーンで流量を絞って出力を低減できるが、水流が乱れて水車損傷の原因となり得るキャビテーションやホワールの発達や、振動や騒音の増加が懸念される。可変速機では、回転速度を下げることで水車性能の優れた領域での運転が可能となって水流の乱れが抑制され、低い出力でも高効率で運転することができる。

3. 更新後の奥清津第二発電所2号可変速機の特長

更新で納入した可変速機の特長として、変換器、及び起

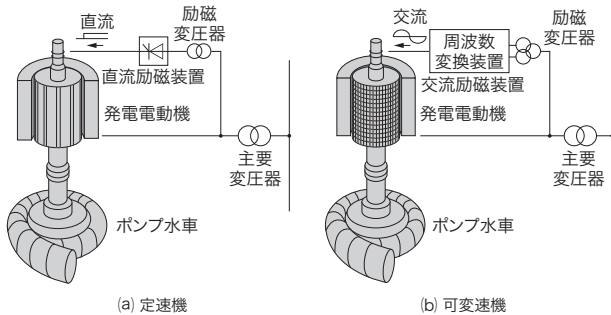
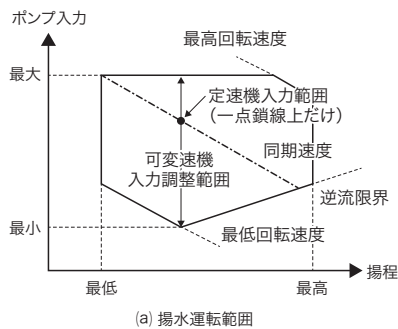


図1. 定速機と可変速機の比較

定速機と可変速機では、発電電動機及び励磁装置が異なる⁽¹⁾。

Differences in constant-speed and adjustable-speed pumped-storage hydropower systems



(a) 揚水運転範囲

動の高速化について、以下に示す。

3.1 変換器

更新後の変換器の仕様を表1に示し、外観を図3に示す。変換器は、三相インバータ4台と三相コンバータ2台

表1. 変換器の仕様

Main specifications of secondary excitation device power converter

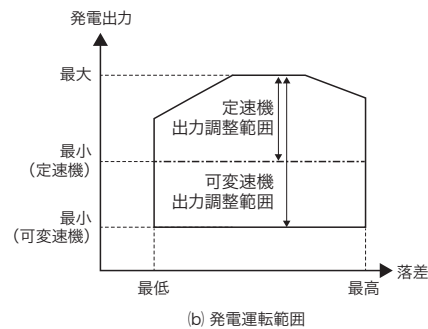
	インバータ	コンバータ
定格容量	31.5 MVA	20.0 MVA
定格電圧	3,040 V	6,240 V
定格電流	5,980 A	926 A × 2台
変換器直流電圧	8,000 V	
装置構成	4S-1P-6A, 2並列, 2多重	4S-1P-6A, トランス2多重
使用素子	IEGT	



図3. 更新後の変換器

IEGTの採用で、更新前に比べて体積を約37%削減し、小型化できた。

Secondary excitation device power converter installed at Okukiyotsu No. 2 Power Station Unit 2



(b) 発電運転範囲

図2. 可変速機の運転範囲

定速機に比べ、可変速機は入力・出力の調整範囲が広い。

Adjustable-speed pumping operation and power generation operation ranges

の構成とし、その間の直流回路にチョッパ回路を設置している。またインバータは、分圧リアクトルを介して多重化し、キャリア周波数の位相をずらして運転することにより高調波を抑制している。

発電電動機とインバータの間には過電圧保護回路を設置し、発電所が接続する電力系統の故障などにより発生する励磁回路の過電圧を抑制し、発電電動機と変換器を保護している。

変換器には、最新の大容量パワー半導体素子である IEGT (Injection Enhanced Gate Transistor) を採用した。IEGTは、更新前の変換器に使用していたパワー半導体素子である GTO に比べて低損失であり、周辺回路の部品が少ないことから小型である。更新後の変換器は、更新前と比較し、損失を約 26 %、体積を約 37 % 削減できた。

3.2 起動の高速化

発電運転、揚水運転及び調相運転の起動を、それぞれ高速化した。図4に、現地での起動試験の結果を示す。

発電運転では、落下させた水によりポンプ水車を回転させることで主機を起動、加速させる。今回の更新では、水路系過渡現象の解析結果に基づいて、サージタンク水位変化を適正な範囲に保つように、自動負荷調整 (ALR) 制御を見直したことで、主機起動指令から最大負荷に到達するまでの時間を、更新前に比べて約 33 % 短縮した。

また、水をくみ上げる揚水運転や、主機を空転させて無効電力を調整する調相運転では、発電電動機に電気エネルギーを供給して主機を起動、加速させる。この発電所では、変換器から電気エネルギーを供給する自己始動方式を採用している。変換器の起動準備時間の短縮と、水車の回転速度や発電電動機の状態を起動過程に沿ってモニタリ

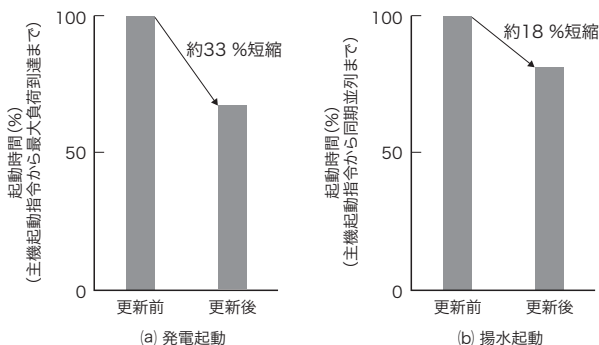


図4. 更新前後の現地での起動試験結果

変換器の起動準備時間の短縮と最適制御の採用で、起動時間を大幅に短縮し、起動の高速化を実現できた。

Results of startup time measured in on-site tests before and after replacement

しながら、水車の回転速度や変換器の出力をリアルタイムで調整する制御により、主機起動指令から同期並列までの時間を、更新前に比べて約 18 % 短縮した。

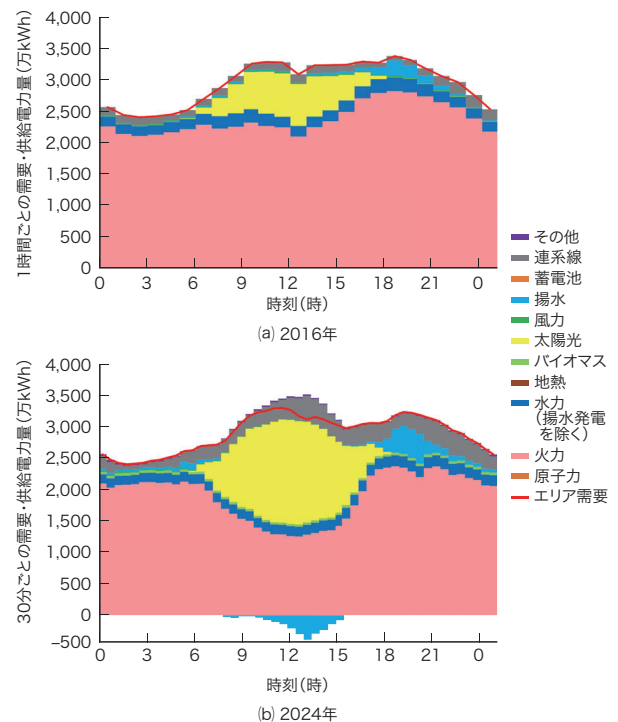
4. 奥清津第二発電所2号可変速機の運用事例

でんき予報⁽³⁾から奥清津第二発電所が連系する東京エリアの需給実績を調査し、ユニット別発電実績公開システム⁽⁴⁾から奥清津第二発電所2号可変速機の発電実績を調査して、可変速機の運用を推定した。

4.1 電源構成の変化に伴う運用の変化

図5に、東京エリアにおいて変動再エネの発電比率が高くなる4月の需給実績を、2016年と2024年で比較して示す。揚水発電システムの発電量に着目すると、2016年は日中に発電運転が行われている場合が多い。一方、2024年は、日中に揚水運転を行い、夕方から発電運転が行われている場合が多い。

2016年は、一定出力で運用した方が効率的な火力発電がベースロードを担っており、変動再エネの発電比率が少なく、揚水発電システムは日中も発電運転が行われていたと考



*東京電力パワーグリッド、「東京エリア」の「エリア需給実績データ」⁽⁹⁾を基に作成

図5. 東京エリアにおける4月の需給実績

2016年に比べ、2024年の発電量は、太陽光発電が増えて火力発電が減り、揚水発電システムは日中に揚水運転が行われて、運用が変化している。

Actual power supply and demand for Tokyo in April 2016 and 2024, respectively

えられる。一方、2024年は、太陽光発電の発電量が増え、火力発電の発電量は減っている。太陽光発電の発電量が多くなる日中には火力発電の発電量を減らすとともに揚水運転が行われ、太陽光発電の発電量が少なくなる夕方から発電運転が行われ、電力需給を調整する機会が増えたと考えられる。

図6に、2024年4月15日の奥清津第二発電所2号可变速機の発電実績を示す。ユニット別発電実績公開システムでは、発電量だけが公開されており、揚水運転の実績は確認できない。

しかし、夕方から発電運転が行われていることから、前述と同様に日中は揚水運転が行われていたと考えられる。また、時間帯により発電量に変化が見られ、最大出力の約40～70%でLFC（負荷周波数制御）が行われていたと考えられる。

4.2 夏季の運用

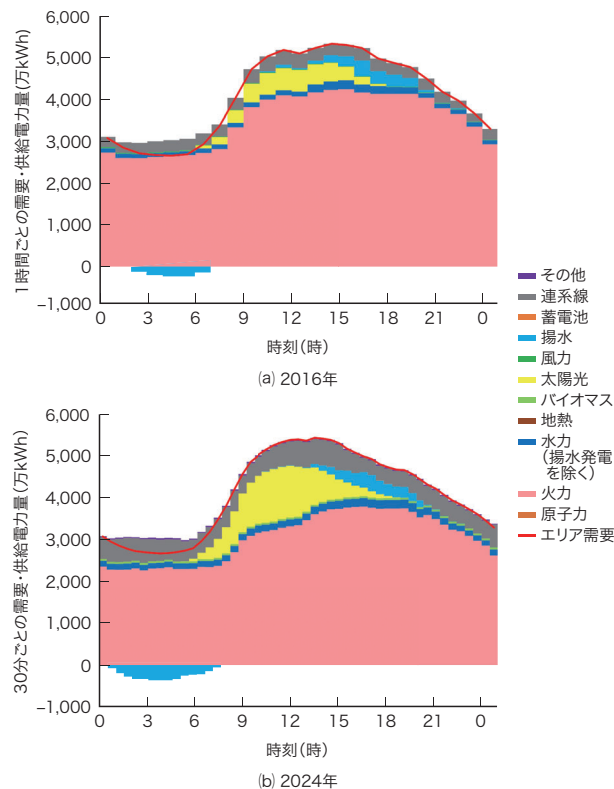
図7に、東京エリアにおいて1年の中で最も電力需要が高くなる8月の需給実績を、2016年と2024年で比較して示す。2024年は揚水発電システムの発電量に着目すると、2016年も2024年も同様に、電力需要が高くなる日中に発電運転が行われ、深夜から明け方にかけて揚水運転が行われている。

8月は変動再エネの発電比率が少なく、火力発電の発電比率が多くなる。そのため、電力需要がピークになる日中に発電運転が行われ、夜間は電力需要のピークに備えて揚水運転が行われていたと考えられる。

図8に、2024年8月5日の奥清津第二発電所2号可变速機の発電実績を示す。

昼から発電運転が行われており、前述と同様に夜間に揚

水運転が行われていたと考えられる。また、4月と同様に、時間帯により発電量に変化が見られ、最大出力の約40～80%でLFCが行われていたと考えられる。

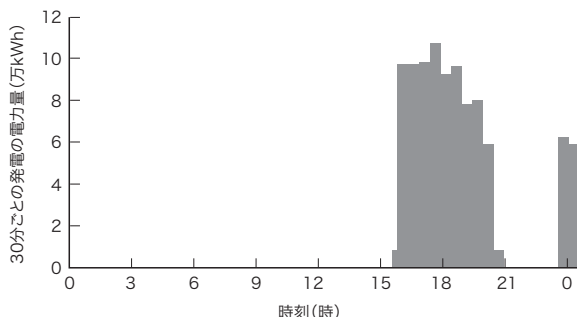


*東京電力パワーグリッド、「東京エリア」の「エリア需給実績データ」³⁾を基に作成

図7. 東京エリアにおける8月の需給実績

2016年に比べ、2024年の発電量は、太陽光発電が増えて火力発電が減るが、揚水発電システムは夏季の運用に大きな違いはない。

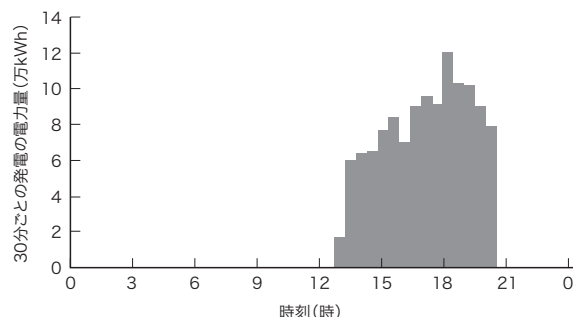
Actual power supply and demand for Tokyo in August 2016 and 2024, respectively



*電力広域的運営推進機関、「ユニット別発電実績公開システム」⁴⁾を基に作成

図6. 2024年4月15日の奥清津第二発電所2号可变速機の運用実績
夕方から発電運転を行い、時間帯により発電量に変化が見られる。

Plant operation data of the adjustable-speed pumped-storage system for Unit 2 at Okukiyotsu No.2 power station measured on April 15, 2024



*電力広域的運営推進機関、「ユニット別発電実績公開システム」⁴⁾を基に作成

図8. 2024年8月5日の奥清津第二発電所2号可变速機の運用実績
昼から発電運転を行い、時間帯により発電量に変化が見られる。

Plant operation data of the adjustable-speed pumped-storage system for Unit 2 at Okukiyotsu No.2 power station measured on August 5, 2024

5. あとがき

可変速機の特長、及び更新後の奥清津第二発電所2号可変速機の特長とその運用が変化した事例について述べた。

我が国だけでなく世界中で変動再エネが増加して、電源構成に変化が見られる中、電力系統の運用において調整力に優れる可変速機の価値は高まっており、今後、発電所の新設をはじめ、定速機からの改造の需要も増えてくることが予想される。

1990年に当社が世界で初めて実用化して以降35年にわたる運転実績と、奥清津第二発電所2号可変速機の更新で得た実績を基に、可変速機の普及を通じて電力系統の安定化へ貢献していく。

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) 森 淳二, 揚水発電技術, エネルギー・資源, 2021, **42**, 4, p.30-34.
- (3) 東京電力パワーグリッド, “でんき予報”. 東京電力ホールディングス, <<https://www.tepco.co.jp/forecast/index-j.html>>, (参照 2024-11-01).
- (4) 電力広域的運営推進機関(OCCTO), “ユニット別発電実績公開システム”. <<https://hatsuden-kokai.occto.or.jp/hks-web-public/disclaimer-agree>>, (参照 2024-11-01).



金田 大成 KANEDA Hironari
東芝エネルギーシステムズ(株)
パワーシステム事業部 水力サービス技術部
Toshiba Energy Systems & Solutions Corp.



利光 智圭 TOSHIMITSU Tomoyoshi
東芝エネルギーシステムズ(株)
府中工場 発電システム制御部
電気学会会員
Toshiba Energy Systems & Solutions Corp.



柏木 航平 KASHIWAGI Kohei
(株)TMEIC
パワーエレクトロニクスシステム事業部 パワーエレクトロニクス部
電気学会会員
TMEIC Corp.