

# 電力系統の品質向上に寄与する水力発電技術

Hydroelectric Power Technologies Contributing to Power System Quality Improvement

向井 一馬 宇藤 祐悦

MUKAI Kazuma

UTOU Yuuetsu

電力系統は負荷が変化しても周波数や電圧を一定の範囲内に保ち、電力の品質及び安定度を維持する必要がある。水力発電は発生電力を広範囲に短時間で調節でき、また揚水発電機や同期調相機は大容量の無効電力を調整する機能を持っている。更に、可変速揚水発電は揚水運転中でも自動周波数制御(AFC)が可能であり、これを応用したフライホイール周波数変動抑制装置(ROTES)は有効・無効電力を高速に調整することができる。これらの水力発電機は、系統の電力品質向上のうえで重要な設備である。更に負荷の追従性を向上させるポンプ水車の高速切替え技術やアドバンストガバナ制御が開発されている。

A power system must be controlled to maintain high-quality and stable frequency, voltage, and other electricity supply conditions even with the occurrence of load fluctuations. Hydroelectric power plants have functions suitable for the rapid adjustment of generating power over a wide range. In particular, generator-motors for pumped storage and synchronous condensers have the function of adjusting large reactive power. An adjustable-speed pumped storage system is able to perform automatic frequency control (AFC) even when in pumping mode, and flywheel generators, which are an application of the adjustable-speed pumped storage system, are able to adjust both active and reactive power. These hydroelectric power technologies are contributing to the quality improvement of power systems.

## 1 まえがき

電気は一般的に蓄えることができないため、発電した瞬間に負荷として使用される。この負荷の量に対して発電量を常に同量としておかなければ系統の周波数低下や電圧低下を引き越し、系統が不安定な状態となる。

近年では瞬時の停電に対しても産業に与える影響が大きくなっており、更に、電力自由化や分散電源の適用拡大に伴い、ますます電力系統の品質維持・向上が重要な課題となってきた。

水力発電は、他の大規模電源である火力や原子力と異なり、熱時定数がないため短時間で始動でき、水車に流入する水量を調整することにより高速に発電量を变化させ負荷に追従する機能を持っている。また、揚水発電は、電力を水的位置エネルギーに変換する大規模な電力貯蔵機能を持っているため、負荷を平準化し系統の効率運用に寄与している。更に、水力発電技術を応用した同期調相機やROTESは、需要地の近傍で系統電圧や周波数の安定化に寄与している。このように、水力発電技術は系統の安定した運用や効率運用に不可欠な存在である。

## 2 水力発電設備の機能

電力系統の品質向上や効率運用に寄与する水力発電設備

表1. 水力発電設備の機能  
Functions of hydroelectric power equipment

種類	水力発電設備	運転予備力	瞬動予備力	AFC	周波数変動抑制(高速制御)	調相運転	電圧変動抑制(高速制御)
定速機	一般水力				-	-	-
	揚水発電				-		-
	同期調相機	-	-	-	-		-
可変速機	可変速揚水発電						
	ROTES	-	-	-			

の機能を表1に示す。

各機能の内容は次のとおりである<sup>(1)</sup>。

- (1) 運転予備力 停止中の発電機が始動から10分以内に最大出力まで供給可能な供給予備力
- (2) 瞬動予備力 周波数低下に対して運転中の発電機が即座に出力増加が図れる供給余力
- (3) AFC 時々刻々の負荷変動(周波数変化)に対して、指令に従って行われる出力調整
- (4) 周波数変動抑制 発電所直近の系統周波数の変動を検出し、秒オーダーで高速に行われる出力調整
- (5) 調相運転 進み、及び遅れの無効電力を系統へ供給する運転
- (6) 電圧変動抑制 急激な電圧変動に応じて高速に無効電力を供給する機能

### 3 主な水力発電設備の特長

#### 3.1 揚水発電

揚水発電は数十万から100万kWを超える発電量を数時間供給できる大規模な電力貯蔵システムであり、電力システムを効率よく運用するための負荷の平準化に不可欠な設備である。

また、停止状態から10分以内で最大出力に到達可能であり、運転予備力や瞬動予備力として電力システムの運用に寄与する。

更に、励磁量を制御することで進相から遅相まで連続して広範囲に無効電力を調整することが可能であり、系統の電圧安定化の一翼を担っている。

東芝は、経済的な発電所建設の要求に応える高落差大容量機の開発、高効率機の開発、更には部分負荷効率を向上させるスプリッターナの揚水機への世界初適用など、常に世界の揚水発電技術をリードし、数多くの実績により高い信頼性を確保している。

#### 3.2 同期調相機

近年、インバータ機器を用いた負荷が増加し、電圧を維持するために多くの無効電力を供給する必要性が増してきている。一方、年末年始などの軽負荷時には電圧が高くなりやすく、無効電力を吸収する必要がある。

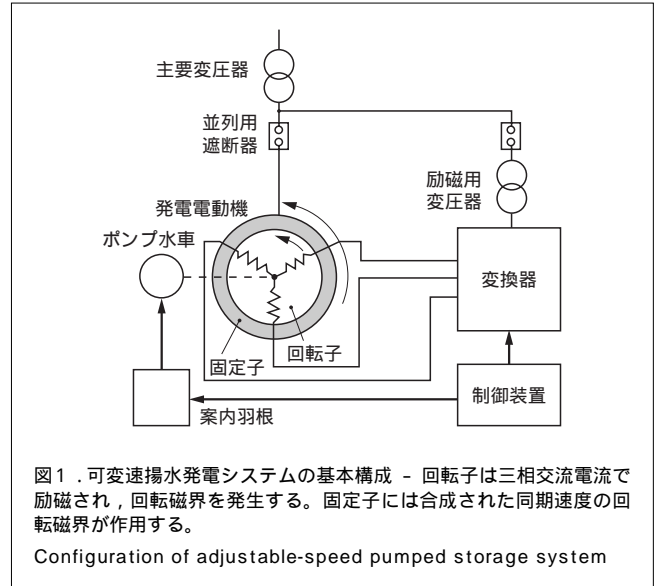
これらの要求に確実に応えるのが同期調相機である。

同期調相機は水車発電機とまったく同じ構造であり、励磁制御により無効電力量が調整できる。回転機としての強みである内部誘起電圧を有しているため、系統の電圧が低下しても一定の無効電力が供給できる。当社は、揚水機などで培った高速・大容量機の技術により、コンパクトで信頼性の高い機器を東京電力(株)新所沢変電所(200MVA-500min<sup>-1</sup>)、及び新飯能変電所(同一定格)へ納入している。

#### 3.3 可変速揚水発電<sup>(2)</sup>

一般の揚水機は発電電動機に同期機を用いており、一定の回転速度で運転される。発電運転時にはポンプ水車のガイドベーン制御により水車出力が制御され、AFC運転が可能である。しかし、揚水運転時はポンプの特性上、一定の回転速度におけるポンプ入力是一定であり、入力調整ができないため、夜間などの軽負荷時には負荷(周波数)が変動しても揚水機で入力調整を行うことができない。

可変速揚水発電は揚水運転時の入力調整を可能にし、系統の経済的な運用と周波数調整容量の確保を目的に開発されたシステムである。このシステムは発電電動機の回転子を三相巻線型の構成にし、この回転子に可変低周波の三相交流電流を流して発電電動機を励磁する。三相交流の励磁電流により回転子に回転磁界が発生し、固定子側にはこの回転磁界に回転子が物理的に回転することによる磁界の回転が重畳して作用するため、同期速度以外の回転速度であ



っても、固定子出力端子は系統周波数と同期を保ち続けることができる。

可変速揚水発電システムの基本構成を図1に示す。

ポンプの入力調整幅は回転速度の変化幅のおおよそ3乗に比例するので、速度を変えることでポンプ入力、すなわち負荷を調整できAFC運転が可能になる。

当社は、1990年に世界初の可変速揚水発電システムを東京電力(株)矢木沢発電所(85MVA)に納入し、12年以上にわたり順調に運転を続け、電力システムの効率運用や品質向上に寄与している。その後、東京電力(株)塩原発電所(360MVA)、電源開発(株)奥清津第二発電所(345MVA)、及び資源エネルギー庁の委託により建設された沖縄やんばる海水揚水発電所(31.5MVA)に可変速機を納入し、各機器とも電力システムのニーズに従って活躍している。

#### 3.4 ROTES<sup>(3)(4)</sup>

ROTESは、可変速揚水発電機の特長である次の機能に着目して当社が開発したシステムである。

- (1) 可変速度で系統に接続して運転ができる。
- (2) 回転体にエネルギーが蓄積できる。
- (3) 高速に有効電力、無効電力を独立して制御(吸収、放出)できる。

同期調相機と同様にポンプ水車を取り去って発電電動機と交流励磁装置で構成している。蓄積エネルギーを増加させるために、回転子にフライホイールを直結することも可能である。

ROTESの外観を図2に示す。

電力系統で急峻(きゅうしゅん)な負荷変動が発生すると、発電量と負荷量のバランスがくずれ系統周波数が変動する。独立系統などで系統全体の容量が小さい場合は、特に変動量が顕著になる。

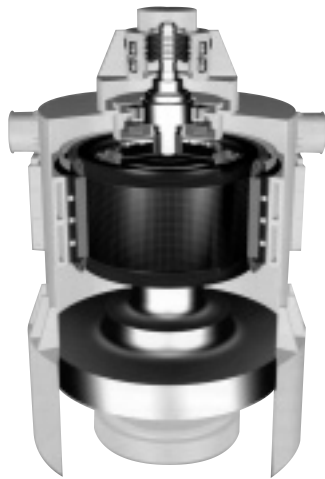


図2 . ROTESの外観 - 可変速揚水発電機の応用システムであり、周波数変動及び電圧変動を抑制して電力系統の安定化に寄与する。  
Structure of rotary energy storage system (ROTES)

ROTESは、系統周波数が低下した際には系統へ電力を供給し、周波数低下を回復させるように制御される。蓄積されている回転エネルギーを電力に変換して放出するため回転速度が低下するが、可変速システムであるため速度の低下に応じて励磁周波数を変化させ、同期を保つように制御される。系統周波数が高くなる場合には逆の動作となり、設備として許容される可変速幅の範囲内で電力の吸収、放出を繰り返し、負荷の変動を抑制する。

当社は、沖縄電力(株)中城湾変電所に世界初のROTESを納入し、96年から運転を開始して電力系統の周波数変動抑制に貢献している。主な機器定格は、以下のとおりである。

定格容量：26.5 MVA

回転速度：600 min<sup>-1</sup> ± 15 %

フライホイール効果(GD<sup>2</sup>)：710 t・m<sup>2</sup>

二次励磁装置：サイクロコンバータ 6.55 MVA

ROTESは、専用の高速マイクロプロセッサを用いた制御装置により励磁電流の位相と大きさが制御され、有効電力と無効電力を独立して瞬時に調整することができる。このため、静止型無効電力補償装置(SVC)と同等に高速で無効電力制御も行え、系統電圧の安定化に寄与することができる。

## 4 負荷追従性を向上させる技術

### 4.1 ポンプ水車高速切替え技術(揚水から発電へ)

電力系統内にある大規模発電所でトラブルが発生し、発電機が急停止を余儀なくされると、電力系統を安定に保つため急に他の発電所で大電力の発電が必要となる。この発電指令が揚水運転中の揚水発電所に出され、揚水運転を急停止して短時間で発電運転に移ることができれば、それまで揚

水動力として使用していた消費電力を減らし、続く発電運転でほぼ同量の電力を生み出すことができる。したがって、ポンプ水車定格容量の約2倍に相当する電力を供給できることになり、ポンプ水車の揚水運転から発電運転への高速切替えは大きな意義がある。このことは、系統が小さいほどその重要性が増してくる。

通常、揚水運転停止時にはガイドベーンを完全に締め切って主機を停止させる。この状態でポンプ水車を減速させる手段は、主に密閉されたランナ室内に閉じ込められた水をランナが攪拌(かくはん)する抵抗であり、停止するまでに長い時間を要する。一方、発電方向昇速時は、ガイドベーンの開度を大きくすれば短時間に回転上昇させることができる。したがって、揚水運転から発電運転に高速に切り替えるには、いかに短時間に揚水運転状態から停止できるかがポイントとなる。

当社で開発した水力的ブレーキによる減速方法はガイドベーンを完全に締め切らず、回転方向と逆向きの高圧水流をランナに作用させるもので、大きなブレーキ効果が期待でき、大がかりな設備も不要である。

図3はポンプ水車の完全特性の一例を示したもので、丸の大きさは水圧脈動の大きさを表している。第3象限の揚水運転から第1象限の発電運転に移るためには、水圧脈動が大きい第2象限のポンプブレーキ領域、すなわちランナにとってもっとも厳しい逆流領域を通らなければならない。

ガイドベーン開度を大きく設定し、大流量の高圧水をランナに作用させれば、短時間に停止状態に導くことができる反面、ランナには過大な変動荷重が作用し、大きな振動も静止部に発生する。したがって、この方法を適用するためには、ランナに作用する過大流体力を抑制しつつ、短時間に停止に導くような制御方法を見出すことが重要となる。

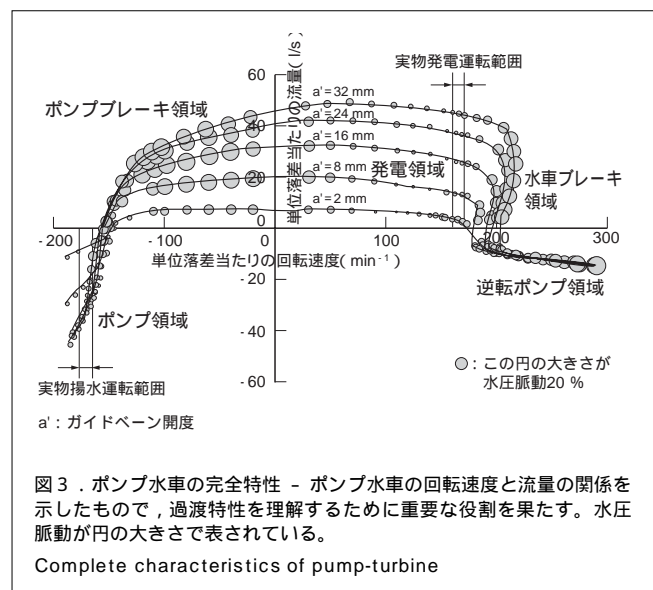


図3 . ポンプ水車の完全特性 - ポンプ水車の回転速度と流量の関係を示したもので、過渡特性を理解するために重要な役割を果たす。水圧脈動が丸の大きさと表されている。

Complete characteristics of pump-turbine

当社の水力研究所では、過渡試験モデルを用いて、多くのパラメータを変え最適制御モードを求めている(図4)。

その結果、ランナが許容できる水圧脈動レベルの下で、従来の最短切替え時間の約1/2まで短縮可能であることを検証した(図5)。

#### 4.2 アドバンストガバナ制御<sup>(5)</sup>

水車の負荷調整指令に対する追従性向上技術として、当社は東京電力(株)と共同でアドバンストガバナ制御方式を開発した。水力発電所では負荷の急変による水路の流量急変

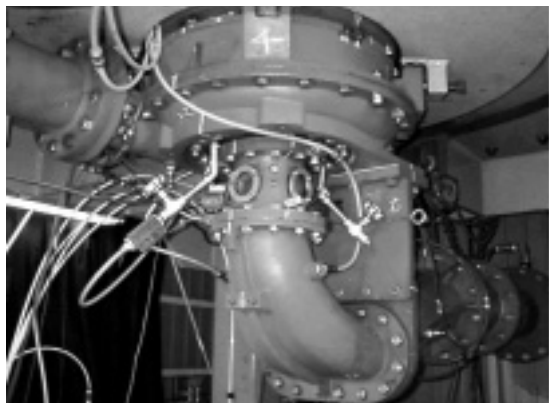
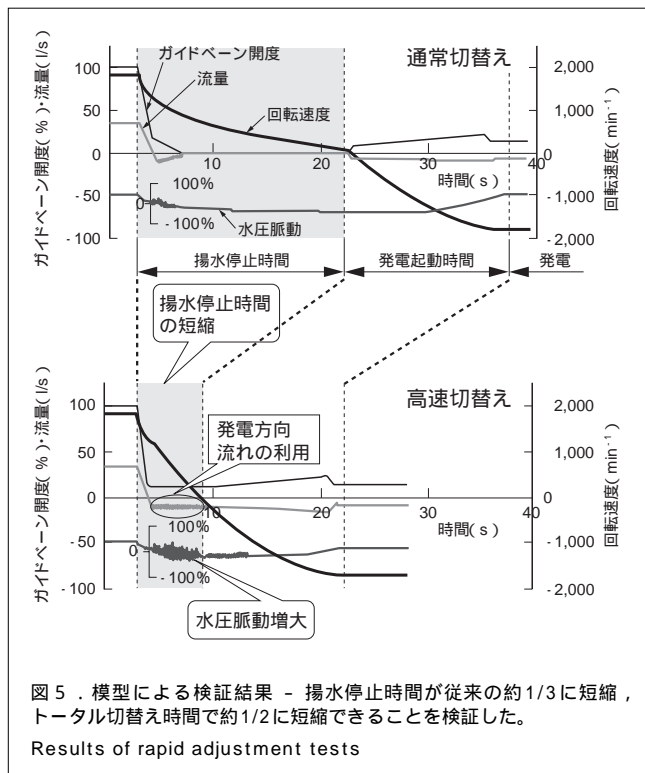


図4 過渡試験装置 - 負荷遮断や入力遮断などの過渡現象を模擬でき、瞬時流量のほか各部の水圧脈動、軸トルク、軸スラストなどが同時に測定される。

Transient test rig



により水圧鉄管や水車の水圧が急上昇するため、この圧力変動を吸収するサージタンクを設けている。しかし、負荷変動によりこのサージタンク水位が長時間安定しない水位サージングを発生することがあり、負荷追従性の制約となっている。アドバンストガバナ制御では、最適制御理論に基づく制御設計で水位サージングを抑え、フィードフォワードを併用して負荷追従性の向上が図れる。アドバンストガバナによる負荷追従性能は、模型試験を用いて検証した。

アドバンストガバナ制御装置の実機適用により、給電指令所からのAFC指令に対する応答性が向上し、システムの周波数安定運転に寄与することが期待できる。この制御は次期大容量揚水発電所に適用される予定である。

## 5 あとがき

水力発電及びその応用設備は、ここで述べたとおり、他のベース電源とは異なる機動性や調整能力に優れた特性を持っている。2000年度の統計によると、わが国の総電源構成に占める水力発電の比率は20%と多くはないが、電力系統の電力品質向上や安定度向上には不可欠な存在である。

当社は、1900年に初めて水車を製造して以来、100余年の間水力発電機器の開発、製造を継続し、数々の記録機を完成させて水力発電技術をリードしてきた。長年にわたり蓄積してきた技術を生かして、今後とも電力系統の品質向上、安定度向上に貢献していきたい。

## 文献

- (1) 稲垣守人,ほか. 電力自由化市場下における揚水発電の役割について. ターボ機械. 31, 2, 2003, p.65 - 71.
- (2) 向井一馬. 大規模電力貯蔵 揚水発電. 電気学会誌. 123, 5, 2003, p.272 - 274.
- (3) 高梨智義,ほか. 21世紀の系統設備として機能する水力発電技術. 東芝レビュー. 54, 12, 1999, p.40 - 43.
- (4) 塚田龍也. 可変速フライホイール発電の実用化. 電気評論. 3, 1997, p.38 - 42.
- (5) 石黒光宏,ほか. 水車におけるアドバンスト制御. ターボ機械. 30, 7, 2002, p.14 - 19.



向井 一馬 MUKAI Kazuma

電力・社会システム社 火力・水力事業部 水カプラント技術部主幹。揚水発電プラントのシステムエンジニアリングに従事。電気学会会員。

Thermal Power & Hydroelectric Power Systems & Services Div.



宇藤 祐悦 UTOU Yuuetsu

電力・社会システム社 電力・産業システム技術開発センター 回転機器開発部。水車模型試験技術開発業務に従事。日本機械学会会員。

Power and Industrial Systems Research and Development Center