

地球温暖化防止に貢献する 可変速揚水発電システム

Hitachi's Adjustable Speed Pumped Storage System Contributing to Prevention of Global Warming

名倉 理

Nagura Osamu

谷 清人

Tani Kiyohito

樋口 幹祐

Higuchi Mikisuke

小宅 孝

Oyake Takashi

地球温暖化防止に向けて、再生可能エネルギー電源の比率は今後ますます増大していくことが予想される。風力や太陽光発電は気候変動の影響を受けるため発生電力量の変動が大きい。従来、電力の需給調整は、変動負荷に対して発電側の出力調整によって行われていたが、再生可能エネルギー電源が発電側に加わるため、既存の発電設備での需給調整機能の向上が必要となる。

日立グループは、世界で初めてとなる有効電力優先制御を採用した可変速揚水発電システムを開発し、従来の設備では不可能であった秒以下のオーダーから時間オーダーまでの電力需給調整機能を提供してきた。今後、多くの可変速揚水発電システムが電力系統に加わることで、地球温暖化防止への貢献が期待される。

1. はじめに

揚水発電所は、夜間の余剰電力を昼間の需要ピーク時に発電電力として供給する時間オーダーの電力需給調整設備として1900年代前半から建設、運用されている。

関西電力株式会社と日立グループが開発した「可変速揚水発電システム」は、従来の揚水発電所のシステムと比較して、揚水および発電のどちらの運転でも高速に電力を制御する機能（有効電力優先制御）を有している。

このような特徴から、従来、電力需要が少ない夜間において、主に火力発電によって行われていた需給調整を可変速揚水発電システムが分担することにより、火力発電の運転時間を短縮でき、CO₂排出量の低減に貢献してきた。関西電力が建設した大河内発電所には日立製の世界最大容量可変速揚水発電システムが2台据え付けられており、15年以上にわたる安定運転の実績がある。

また、再生可能エネルギーである風力発電や太陽光発電が電力供給に占める割合は、今後ますます増加していくものと思われる。発電量の安定供給が難しい風力発電や太陽光発電が電力系統に加わることで、火力発電や水力発

電の比率が相対的に低下し、電力の需給調整がさらに難しくなることが予想される。これは、電力の安定供給の観点から大きな問題となる可能性がある。

可変速揚水発電システムは、高速に電力を調整することが可能であり、風力発電や太陽光発電の比率が増大した電力系統であっても、この高速電力調整により、電力の安定供給に貢献することが可能である。

揚水発電所には上下二つの調整池（ダム）が必要となるが、環境破壊を防ぐためにも立地条件が大きな制約を受ける。日本では揚水発電所の新規建設には土木建築工事も含めると10数年以上もの期間が必要となることや、新規の建設に適した地点が少ないなどの課題がある。これに対し、すでに建設され運用中の揚水発電設備を可変速化するという技術開発にも取り組んでいる。

海外では、大容量水力発電所の建設は大規模なダムの建設を伴うため、環境への負担もクローズアップされている。しかし揚水発電システムは、一度貯水した水を繰り返し使用することから大規模河川を堰（せ）き止めるような大規模なダムを必要とせず、発電所も地下に建設されることから、環境に与える負担も小さく、再生可能エネルギーの占有率がえつつある欧米を中心に、可変速揚水発電システムの導入機運が高まっている。日立グループは、これらのニーズに応えるために、さまざまな開発を継続している。

ここでは、可変速揚水発電システム開発の背景や、技術的な特徴について述べる。

2. 可変速揚水発電システム開発の経緯

電力系統の負荷（電力需要）はさまざまな要因で時々刻々と変動するため、発電（電力供給）側で需給の調整を実施している。需給のバランスが崩れると、周波数や電圧の変動が生じ、電力の安定供給に支障をきたす恐れがある。こ



図1 | 関西電力株式会社大河内発電所鳥観図
上部調整池と下部調整池を有し、環境に及ぼす影響を極小とするため、発電所は地下に建設されている。

のため、負荷の変動に応じて、発電出力も常時調整を行っている。発電設備には大別して、原子力、火力、水力があるが、発電出力の調整が可能な発電設備は火力と水力の一部である。電力需要が少ない夜間では、多くの火力と水力が停止する。原子力の比率が高まることで、需給調整の容量が不足するという問題が生じる。

夜間の余剰電力によって上ダムに揚水し、電力需要が増加する昼間に発電を行う揚水発電は、昼と夜との時間的な需給調整を行う設備として、日本では1930年代から建設されていた。しかし、発電電動機として使用される同期機は回転速度が常に一定であり、ポンプ水車の特性からポンプ(揚水)運転での入力調整はほとんど行われていなかった。

関西電力と日立グループは、夜間の需給調整を揚水運転で実施することを目的として、1981年に可変速揚水発電システムの開発に着手した。1987年に関西電力成発電所において17.5 MW可変速発電実証プラントの運転開始を経て、1993年と1995年には、関西電力大河内発電所で2台の世界最大容量の400 MW可変速揚水発電システムがそれぞれ運用を開始し、その後も順調に運転が行われている(図1参照)。

また、2007年には九州電力株式会社小丸川発電所で世界最高速度の340 MW可変速揚水発電システムが運用を開始した(図2参照)。

3. 可変速揚水発電システムの原理

3.1 交流電動機の速度制御

交流電動機の速度制御方式には、VVVF (Variable Voltage Variable Frequency) として知られる周波数制御方式



図2 | 九州電力株式会社小丸川発電所発電電動機の組立
世界最高の定格速度576~624 min⁻¹発電電動機の回転子組立の様子を示す。400 tを超える質量の回転子が固定子に組み込まれていく。

や、巻線形誘導機のセルビウス方式 (Scherbius System) などさまざまな方式があるが、経済性と同期機の機能を実現するという条件を満足することから、巻線形誘導機の二次励磁制御方式 (Doubly Fed System) を採用した。

二次励磁制御方式は、巻線形誘導機の二次回路(回転子巻線=界磁巻線)の有効電力を変化させることで速度を制御するものである。巻線形誘導機の一次回路(固定子巻線=電機子巻線)を系統に接続すると、界磁巻線にはすべり周波数の電圧が誘起される。この電圧に対して、励磁装置から任意の電圧を印加することで二次回路の有効電力を調整し速度を制御する。

励磁装置に採用したサイリスタ素子で構成されるサイクロコンバータ (Cycloconverter) は二次回路に対し、力行、回生運転が可能であり、同期速度以下での発電運転、同期速度以上での揚水運転を可能としている。また、励磁装置から空隙(げき)磁束を形成する成分の電流、いわゆる同期機の界磁電流を供給することで内部誘起電圧を発生させており、無効電力の制御も可能となる(図3参照)。

3.2 有効電力優先制御

交流電動機は速度制御は鉄道やエレベーターを駆動する電動機は速度制御として開発が進められてきた。このような分野では、快適な乗り心地を供給する加速・減速のように速度を制御することが品質であった。しかし、可変速揚水発電システムにおいては、電力の調整が主目的であり、速度制御は品質とはならない。このことから、指令どおりに有効電力を制御する、有効電力優先制御を開発し、採用した。

制御対象を回転速度から有効電力に変えたことにより、原動機は特性に依存せず高速有効電力制御が可能となり、従来の電力系統に接続される発電設備では不可能であった有効電力の瞬時応答も実現した(図4参照)。

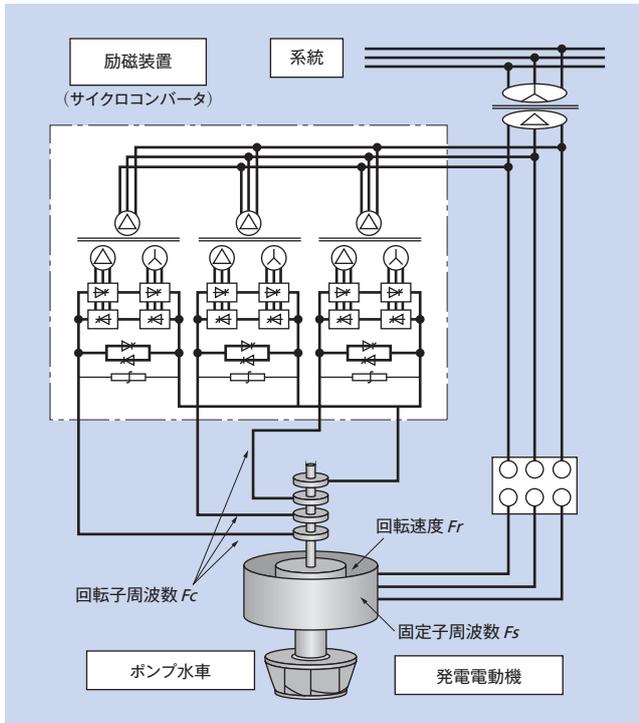


図3 | 二次励磁可変速揚水発電システムの構成
 発電電動機は巻線形誘導機と類似構造で、三相4線式コレクタリングを介してサイクロコンバータから交流励磁される。

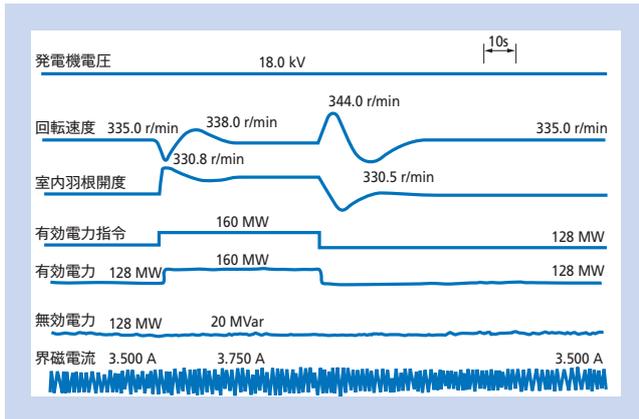


図4 | 有効電力のステップ応答
 原動機の特性に依存しないで高速に有効電力を制御することが可能となったため、ステップ応答も実現可能となった。

4. 構成機器と制御方法の特徴

4.1 ポンプ水車

フランシス型と呼ばれる固定羽根のポンプ水車ランナを用いる定速機においては、回転速度は一定であり、ダム水位によって決まる総落差と電動機入力の関係は一本の曲線となる。つまり、総落差が与えられるとポンプ入力はある値に決まる。一方、回転速度が定格値を中心に数パーセントの範囲で運転できる可変速機では、ある総落差の状態において電動機入力を変化させることができる(図5、図6参照)。

可変速揚水発電システムではポンプ水車の運転条件が広範囲になるとともに、揚水運転時の入力調整範囲の拡大と、発電運転時には高効率求められるため、実際に運転される可変速範囲すべてにわたって安定運転が可能なランナ設

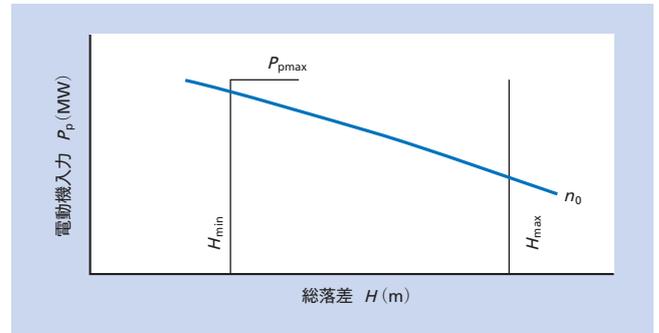


図5 | 定速ポンプ水車ランナの特性
 同期速度 n_0 での運転となるため、総落差 H によって電動機入力 P_p は一義的に決定され調整することはできない。

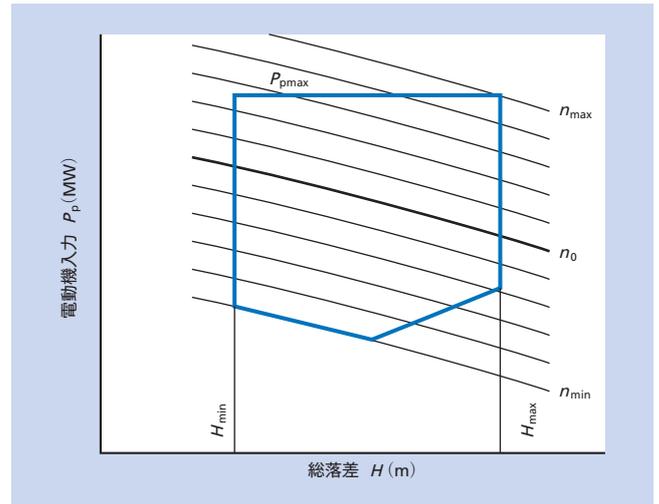


図6 | 可変速ポンプ水車ランナの特性
 最低速度 n_{min} から最高速度 n_{max} までの運転が可能となるため運転条件が広範囲となる。

計が要求される。

関西電力奥多々良木発電所に納入される可変速ポンプ水車ランナには、中間羽根付きランナが採用され、広範囲の運転に対応できるように設計されている(図7参照)。

4.2 発電電動機

固定子は従来の同期機と同じ構造で、電磁鋼板を積層した鉄心に電機子巻線として絶縁を施した三相分布巻線を装着している。回転子は電磁鋼板または薄鋼板を積層した鉄心に界磁巻線として固定子と同様に三相分布巻線を装着し、コレクタリングを介して固定側に引き出されている。コレクタリングは三相4線式で、中性相も引き出されている。空隙の起磁力分布を正弦波状にするため、界磁巻線には三相平衡交流電流が通電される。界磁電流に不平衡成分が重畳しても中性相に流れるため、空隙の起磁力分布は正弦波状に保たれて安定した運転の継続が可能となる。

界磁巻線には高電圧が印加されることと、強大な遠心力による荷重に耐えることにより、絶縁性能と機械的強度を有する特殊な絶縁方式を開発し採用している。開発段階において長期間の運転に対する信頼性も検証してきたが、実



図7 | 製作中の関西電力奥多々良木発電所中間羽根付きポンプ水車ランナ可変速化のために新設計した。羽根長さが長い主羽根と短い中間羽根を交互に配置した中間羽根付きランナで、効率改善と安定運転範囲拡大を実現した。

機においてもその信頼性は実証されている。

界磁巻線のエンド部は外周側に巻かれたバインドによって支持される。バインドにはステンレス鋼線または高強度繊維素材が使用される。300 MW級可変速発電電動機の回転子は総質量が400 tを超え、直径も4 m以上となり、輸送上の問題から発電所内で組立を実施する。

4.3 励磁装置

励磁装置にはサイクロコンバータを採用し、変換素子にサイリスタを用いている。サイリスタはそれ自体では電流を遮断しない他励の変換素子であり、遮断電流で過電流耐量が決まる自励式素子と比較して過電流に強いいため、本質的に、系統事故などの外部異常起因の過電流が想定される電力用途の大容量変換器に適している。

一方でサイリスタは逆導通しないため、逆方向の電流が流れようとする回路開放状態となる。可変速機では、系統事故などによって発電機の固定子側に非同期成分電流が流れると回転子電流には交流起電力が発生する。導通しているサイリスタに対して正方向であれば通電するが、逆方向となると回路が開放状態となり過電圧が発生する。この過電圧を解消し運転継続を可能にする制御が「高速PN (Positive-Negative) 切換」である。これは、発生した過電圧を各相ごとに検出し、過電圧相では一時的にサイクロコンバータのPN動作群を反転させて脈動電流を流すことによって過電圧状態を解消する方式である。この「高速PN切換」によって、励磁を継続しつつ非同期成分による起電力を短絡するという、従来の同期機の制動巻線と同じ「系統事故時の運転継続」機能を実現することでシステムの運転信頼性を高めた。さらに、過電圧を抑制するためのアレスタ装置を小型化することが可能となった。また、励磁回路は三相回路に加えて中性相を備えた三相4線式としてお

り、高速PN切換の動作で生じる不平衡電流成分を中性相に流すことにより、他の二相の電流を正常に保つことが可能である。

また、サイリスタは外部電源によって転流するため、系統事故などで電圧が低下すると転流失敗を生じ、電流制御能力が低下して過電流状態となる場合がある。このため、転流失敗を装置の保護停止が必要な内部事故から判別する保護方式によって転流失敗を区別し、また通電電流からサイリスタの素子温度を推定演算して素子耐量範囲内であれば運転を継続する保護思想としている。この保護方式によって、系統事故の際には、サイリスタの過電流耐量を生かしつつ励磁回路を短絡することなく励磁を継続することが可能となっている。

4.4 制御方式

系統並列時の励磁モードを大別すると「すべり励磁モード」と「同期励磁モード」があり、両者を状況に応じて切り換えながら運転を行っている。

すべり励磁モードは通常の可変速運転時に使用され、有効電力優先制御を行うために出力端(システム出力)の有効電力を検出し、有効電力が指令値に一致するよう界磁電流の位相を励磁装置の出力電圧によって制御する。また、励磁は系統周波数と回転子周波数の差である「すべり周波数」で行われる。

発電電動機側から見ると、すべり励磁モードでは界磁電流の位相が制御されており、同期機における内部相差角を制御していることになるため有効電力優先制御を高速に行うことが可能となる。この制御では電力系統の電圧位相が急変する系統地絡事故やそれに伴う高速再開路においても脱調することなく運転を継続することが可能となる。

有効電力優先制御を採用しているため、調速機制御は速度制御としてのみ働き、可変速運転時は可変速運転範囲を極力逸脱しないように水車出力を調整し、回転速度を制御している。すべり励磁モードでの運転では、有効電力とポンプ水車のトルクに偏差が発生し偏差が回転速度の変動となるため、調速機に与えられる速度指令と実際の速度に偏差が生じる機会が定速機と比較して増えるため、有効電力優先制御との協調のとれた制御が要求される。

同期励磁モードは、可変速範囲逸脱防止制御時に使用される。負荷急増などでガイドベーンを急閉制御すると有効落差が急変する。その際、回転速度が可変速範囲を逸脱しそうになった場合には、励磁周波数を固定することで同期化力を発生させ、回転速度をそのときの励磁周波数に見合った速度に固定する。このとき、発電機特性は定速機(同期機)と同等であるため有効落差変動に応じた有効電力変

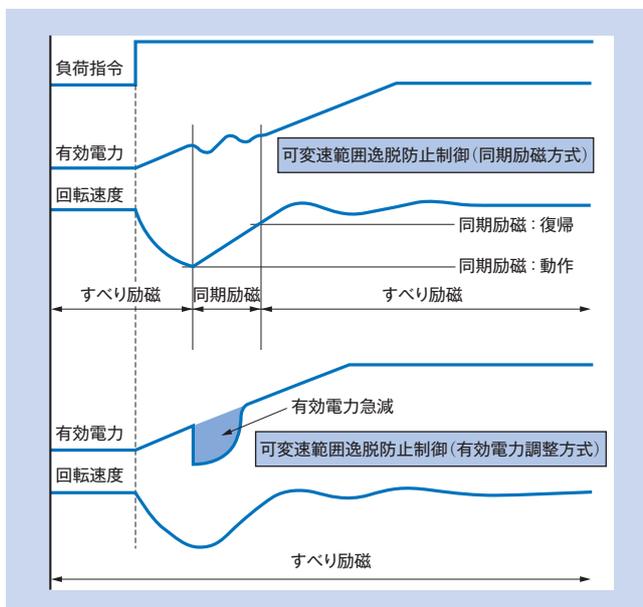


図8 | 可変速範囲逸脱防止制御

可変速範囲逸脱防止制御に同期励磁を使用することで、有効電力調整による回転速度制御と比較し有効電力の変動がより抑えられ、過渡時の系統への影響を少なくしている。

動が発生するが、有効電力調整による回転速度制御よりも有効電力の変動を抑えられるため、この制御方法によって過渡時における系統への影響を少なくしている(図8参照)。

また、同期励磁モードは制御に依存せずに同期化力によって回転速度を固定できることから、有効電力優先制御から速度制御に切り換える必要がなく、揚水運転の起動停止、保護動作による急停止などにも使用される。

5. おわりに

ここでは、可変速揚水発電システム開発の背景や、技術的な特徴について述べた。

夜間における電力の需給調整を揚水発電所で実施するというコンセプトで開発に着手した可変速揚水発電システムは、構成される機器の信頼性確保にとどまらず、有効電力優先制御、系統事故時の運転継続、同期励磁モードなど、運用面での利便性と安定性を向上する機能についても技術開発を行い、実現してきた。

有効電力優先制御は同期機の内部相差角を制御によって変化させることができる制御であり、実際の電力系統に接続して試験を実施することには多大なリスクを伴う。そのため、原動機、発電電動機、励磁装置、制御装置および電力系統を模擬したアナログシミュレータによって技術を開発してきたが、最終的には実際の電力系統での検証が必要となった。

電力系統への影響を最小限とし、かつ必要な検証を実施するため、成発電所において17.5 MW実証プラントを実際の電力系統に接続して数々の検証を行うことで関西電

力大河内発電所での400 MW級可変速揚水発電システムの完成に至る技術を開発することが可能となった。

また、従来の揚水発電所と比較しても700 m超という記録的な高揚程、 $576\sim 624\text{ min}^{-1}$ という高回転速度の九州電力小丸川発電所に可変速揚水発電システムが導入されたことで、大容量高速可変速揚水発電システムも実現することが可能となった。

関西電力奥多々良木発電所においては、すでに建設され運用中の揚水発電設備を可変速化するという技術開発にも取り組んでおり、可変速揚水発電システムのさらなる普及が期待されている。

これまで開発された技術は夜間における電力の需給調整を揚水発電所で実施し、火力発電所の停止時間を増やすことでCO₂の排出量削減にも貢献してきた。さらに、再生可能エネルギーの比率が増大しても、電力の入出力が調整可能な大規模エネルギー貯蔵設備として新たなニーズも生まれてきており、今後もさらなる技術開発を行い、電力の安定供給に貢献していく。

参考文献

- 1) 西, 外: 交流励磁同期機の励磁電流制御方法, 平成4年電気学会電力エネルギー部門大会, No.11 (1992)
- 2) 北: 水力部門へのパワーエレクトロニクス適用技術—可変速揚水発電システム, 電気評論, 1993年9月号 (1993)
- 3) 北, 外: 400MW可変速揚水発電システム—関西電力株式会社大河内発電所4号機一, 日立評論, 76, 10, 733~738 (1994.10)
- 4) 谷, 外: 米国大型揚水発電所ポンプ水車の特性改善—ニューヨーク州電力局ブレンハイム・ギルボア発電所300 MWポンプ水車一, 日立評論, 91, 3, 294~297 (2009.3)

執筆者紹介



名倉 理

1980年日立製作所入社, 電力システム社 日立事業所 電力設計部 所属
現在, 水力用発電機的设计業務に従事
電気学会会員, CIGRE会員



樋口 幹祐

1992年日立製作所入社, 情報制御システム社 パワーエレクトロニクスシステム本部 パワーエレクトロニクス設計部 所属
現在, パワーエレクトロニクスシステム的设计業務に従事
電気学会会員



谷 清人

1993年日立製作所入社, 電力システム社 日立事業所 水力設計部 所属
現在, 水力発電所水車の流体設計に従事
工学博士
日本機械学会会員, ターボ機械協会会員



小宅 孝

1989年日立製作所入社, 情報制御システム社 電力制御システム本部 発電制御システム設計部 所属
現在, 水力機器制御的设计業務に従事