

可変速揚水発電システムによる電力安定供給と最新海外水力発電プロジェクト

西都一浩* 竹重 晋**
 高見健太郎* 岸田和之**
 難波輝晃**

Adjustable-speed Pumped Hydro Power Generation System for Electric Power Stable Supply, and Latest Overseas Projects of Water-power Generation
 Kazuhiro Saito, Kentaro Takami, Teruaki Namba, Susumu Takeshige, Kazuyuki Kishida

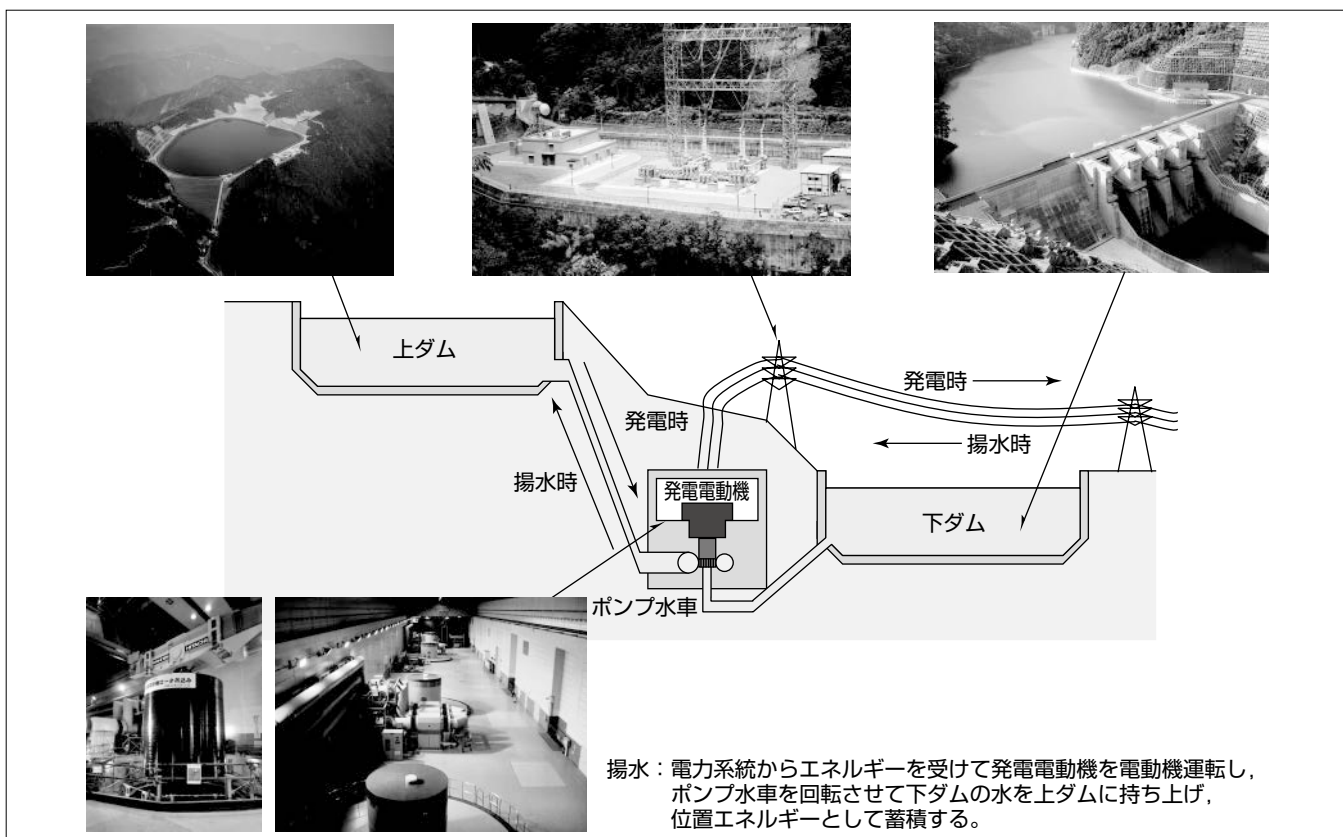
要 旨

近年の地球温暖化などの環境問題に対して、再生可能エネルギーの活用が見直されている。水力発電は水という再生可能エネルギーを効率良く電気に変換することができ、さらに、揚水発電システムでは、電力貯蔵システムとしてもこれまで一定の役割を果たしてきた。その中でも特に可変速揚水発電は、近年の風力発電や太陽光発電等の増加に対し、系統電圧維持及び系統周波数の変動抑制等、電力系統の安定化のために寄与できる発電システムとして注目されている。このため、国内外で可変速揚水発電所の新設や既設揚水発電所の可変速化が進められている。

三菱電機はこれまで1993年に北海道電力(株)高見発電所向けに1台、2010年、2011年に九州電力(株)小丸川発電所向け

に2台、2010年にスロベニアアウチェ発電所向けを1台、合計3発電所4台の可変速揚水発電システムを納入してきた。本稿では、高速大容量機である小丸川機及びアウチェ機の特長と運用状況について述べる。

また、一般水力としては数少ない最高有効落差約500m級の高落差、高回転速度機であるスリランカアップーコトマレ発電所が2012年に営業運転を開始し、スリランカの電力安定供給に大きく貢献している。同発電所の概要と制御システムとして特長的な系統周波数変動調整制御及び水位偏差監視に基づく水位調整制御等、多様な自動運転機能についても併せて述べる。



九州電力(株)小丸川発電所の可変速揚水発電システム

高速大容量可変速機として、運転実績2年以上を経過した小丸川発電所の主要構成を示す。励磁装置によって系統周波数の変動を瞬時に抑制するよう入出力を調整しており、系統電圧維持及び系統周波数の変動抑制等、電力系統の安定化のために貢献している。

1. ま え が き

2011年10月、三菱電機、三菱重工(株)、(株)日立製作所の水力事業分野の三社合併によって、日立三菱水力(株)が発足し、それぞれが培ってきた水力発電システムの技術を共有することで、シナジー効果を発揮することが期待されている。

本稿では、三菱電機が納入し、日立三菱水力(株)が継承した水力発電事業で、系統電圧維持及び系統周波数の変動抑制等の電力系統の安定に貢献している可変速揚水発電システムとして九州電力(株)小丸川発電所、及びスロベニアアウチェ発電所の特長と運用状況について述べる。また、2012年に営業運転を開始し、スリランカの電力安定供給に大きく貢献しているアッパーコトマレ発電所について、そのプラント概要などについて述べる。

2. 可変速揚水発電システムによる電力安定供給

2.1 可変速揚水発電システムの納入実績

2013年現在運用中の可変速揚水発電システムは、全世界で9発電所/14台あり、三菱電機と(株)日立製作所を合わせると、過半数の納入実績を持つ。表1に納入実績を示す。特に2010年にはスロベニアアウチェ発電所の運転を開始し、国内メーカーとして初の海外納入実績を持つ。

2.2 小丸川機とアウチェ機の特長と運転実績

従来の可変速揚水発電システムに比べ、小丸川機とアウチェ機では回転速度を高速化し、発電電動機の体格を縮小して経済性を向上させるとともに、大容量GCT(Gate Commutated Turn-Off)サイリスタを使用した小型・低損失な励磁装置を適用した。

2.2.1 特 長

可変速発電電動機の回転子には、一般揚水機の回転子と異なり、固定子と同様の三相巻線を適用するが、回転速度の二乗に比例して遠心力が働くため、高速になるほどコイルエンド部の強度確保が困難となる。従来、最高回転速度は 429min^{-1} であったが、小丸川機とアウチェ機は回転速度 600min^{-1} の世界最高速級の可変速発電電動機であり、バインド線による回転子コイルエンド支持構造を更に高速機向けに改良し、高速機向けのコイルエンド支持の技術を確立した(図1、図2)。

2.2.2 運転実績

小丸川機とアウチェ機は運転実績2年以上を経過し、高速大容量可変速機として安定した運転を継続している(表2)。

2.3 可変速揚水発電システムによる電力安定供給

これまでの揚水発電所は、揚水運転時の電動機出力は負荷であるポンプ特性から揚程に応じた一定出力(速度一定のため調整不可)となるが、可変速機では、任意の回転速度で運転可能であることから、揚水入力調整による電動機の出力変化に伴い、回転速度も安定して変化し、運転を継続する。図3は小丸川機の揚水運転トレンドデータを示しており、揚水入力の変化に追従して、回転速度が変化している。加えて、可変速機では揚水運転時の入力調整が可能となったことから、従来の揚水機では不可であった揚水時のガバナフリー機能を励磁制御による高速ガバナフリー運転として実現しており系統周波数変動の抑制に大きく貢献している。

図4に小丸川発電所の揚水運転時における中給指令値、実揚水入力及び系統周波数をプロットしたグラフを示す。系統周波数変動が $60\text{Hz} \pm 0.1\text{Hz}$ 以内に抑制されていることが分かる。

なお、欧州では、日本国内に比べ再生可能エネルギー(風力発電、太陽光発電等)の導入が進んでおり、アウチェ機については特に欧州域内の系統の安定化に対し大きく貢献していると客先から高い評価を得ている。

3. スリランカアッパーコトマレ発電所

3.1 プロジェクトの概要

アッパーコトマレ発電所は標高700mに位置しており、最高有効落差約500mを利用して発電を行っている。このプロジェクトは、三菱電機を主契約者としてターンキーで

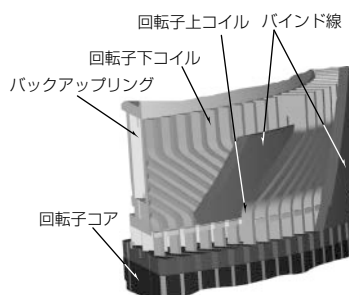


図1. 回転子コイルエンド支持構造 (バインド線方式)



図2. 回転子

表1. 可変速揚水発電システム納入実績

実績	発電所				
	北海道電力 高見#2	関西電力 大河内#3, 4	九州電力 小丸川#1, 4	九州電力 小丸川#2, 3	スロベニア アウチェ
運開年	1993	1995/1993	2010/2007	2011/2009	2010
発電容量(MVA)	105	395	319	345	195
モータ容量(MW)	140	388	330	330	180
回転速度(min^{-1})	231 ± 23	360 ± 30	600 ± 24	600 ± 24	576~626
発電機メーカー	三菱電機	日立製作所	日立製作所	三菱電機	三菱電機
水車メーカー	三菱重工	日立製作所	日立製作所	三菱重工	三菱重工

表2. 小丸川機、アウチェ機の運転実績 (2013年3月末時点)

実績	発電所		
	小丸川#2	小丸川#3	アウチェ
発電運転時間(hr)	約640	約1,000	約4,000
揚水運転時間(hr)	約520	約830	約4,500
発電運転回数(回)	約270	約460	約1,000
揚水運転回数(回)	約230	約430	約1,000

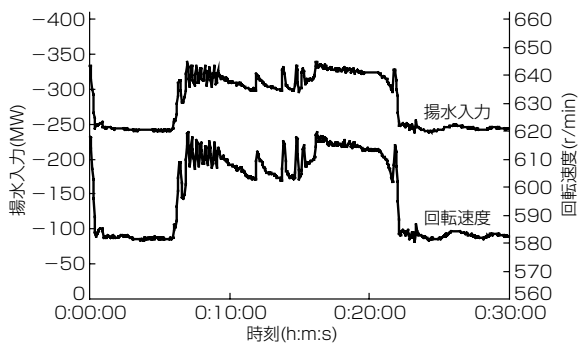


図3. 揚水入力調整と回転速度の変化

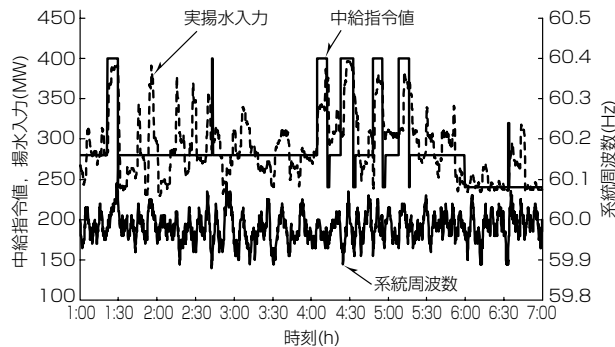


図4. 揚水入力調整による系統周波数の変動抑制

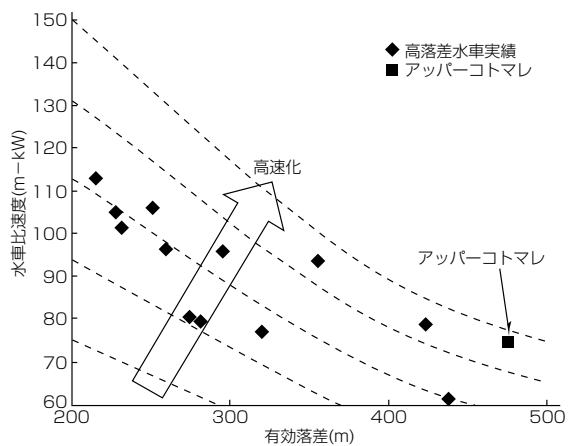


図7. 高落差フランシス水車の納入実績



図8. 2号機ランナ吊(つ)り込み



図5. 配電盤室



図6. 中央制御室

- (1) 水車型式 : 立軸フランシス水車
- (2) 有効落差 : 487.31m(最高)
- (3) 水車出力 : 77,000kW
- (4) 回転速度 : 600min⁻¹
- (5) 入口弁型式 : 球型弁(ロータリー弁)

600min⁻¹という高回転速度機であり、流量も比較的少ないことから、機器サイズは非常にコンパクトである。高落差に耐え得る機器の強度を確保しつつ、機器の設計では各部品の干渉チェックを行い、限られたスペースの中で必要なメンテナンススペースを最大限確保できるよう配慮した。また、発電所自体のスペースもコンパクトであり、限られたスペースに給水ポンプ、圧油装置、圧縮空気装置、潤滑油装置等の必要な機器を配置するため、機器の最適配置、及び配管の取り回しを決定した。

水車関連の現地据付け工事は2010年1月のドラフトチューブ据付けから始まり、現地での厳しい環境のもと約3年に及ぶ現地据付け(図8)、試験を経て2012年7月に1台目、2012年9月に2台目の引渡しが完了した。

3.3 監視制御システム

アッパーコトマレ発電所では、中央給電指令所との通信、距離の離れた発電所と変電所双方での監視制御、ダム水位一定運転等、高度なプラント制御を実現するため、国内及び海外で実績のある三菱電機監視制御システム“MEL HOPE530シリーズ”を適用している。次に監視制御システムの主要諸元と特長、及び、図9にシステム構成を示す。

受注している。三菱電機の供給した主要設備を次に示す。

- (1) 主機2台：水車77MW，発電機88MVA
- (2) 主変圧器2基
- (3) 発電所監視制御システム 一式
- (4) GIS(Gas Insulated Switchgear)他変電所，開閉所設備
- (5) ダム電源設備
- (6) 各種通信設備

アッパーコトマレ発電所の出力150MWは、スリランカ国内のピーク時全発電電力2,000MWの約7%に相当し、年間409GWhの電力の提供を行う。また、系統周波数変動調整制御及び水位偏差監視に基づく水位調整制御等、多様な自動運転機能を持っている。これらの監視制御場所は、図5の配電盤室、図6の中央制御室及び主幹電力系統との接続点であるコトマレ変電所に分散配置されている。

3.2 水車

アッパーコトマレ発電所の水車は、一般水力としては数少ない500m級の高落差、高回転速度機であり、図7に示すとおり三菱電機的全納入実績でも一般水力向けフランシス水車として最高落差機となる。水車の主要諸元を次に示す。

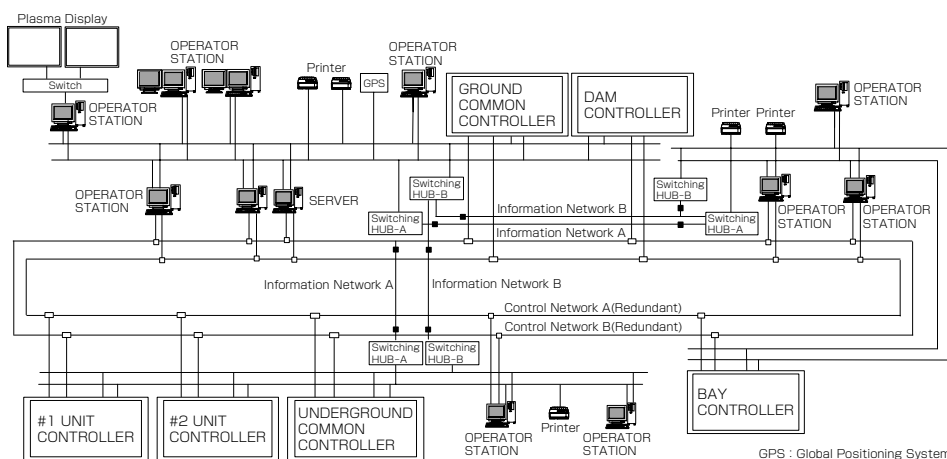


図9. 監視制御システムの構成

- (1) 制御装置台数 : CPU二重化×6セット
- (2) OPS台数 : 8台, 内2台はDual monitor
- (3) サーバ台数 : 2台
- (4) グラフィックパネル : 6台
- (5) 制御ネットワーク : 1 Gbps, 光二重リング(RPR: Resilient Packet Ring)方式
- (6) 情報LAN : 1 Gbps, 二重化Ethernet^(注1) LAN

次にこの監視制御システムの特長を述べる。

(1) 高速な制御ネットワークと長距離伝送

従来は100Mbpsであった制御ネットワークに対し、伝送速度1Gbpsの二重化光リング方式を採用し、最大の伝送速度と高い信頼性を確保している。このシステムは約17km離れた発電所と変電所間を光ケーブルで接続することで、双方のOPS(OPERATOR STATION)による遠隔監視を可能としている。

(2) 機器ごとの制御権選択機能

従来は操作場所単位での選択であった制御権をOPS単位で機器ごとに選択可能としている。例えば、ポンプAの操作権を取得中のOPSは操作可能だが、他のOPSからは監視だけ可能で操作不可となるインターロック機能を備えている。

(3) イベント検出機能

最小20ms幅でのデジタル入力検出機能を備え、リレーの瞬時動作も確実にイベントとして記録可能。また、オプションのシーケンスオブイベント機能では、1ms分解能でのイベント記録を可能としている。

(4) 長期トレンド、イベント記録機能

従来は1秒周期で48時間までであったトレンドデータ保存期間を1秒周期で365日分を可能とした。同じく、従来は1万件までであったイベント記録機能を最大100万件に拡張している。どちらのデータもCSV(Comma Separated Value)形式での自動保存と再読み出し機能を実現している。

(5) 多彩な監視機能

標準的な警報、系統図監視機能に加え、通常は揚水機だ

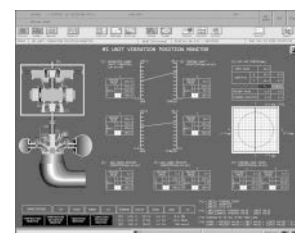


図10. 軸振動監視の画面例

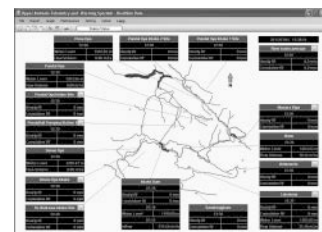


図11. 流入量予測機能の画面例

けに備えられる主給水温度に比例した温度監視、プラント運転状態に応じた可変制限値による温度監視と振動監視、モダル円による軸振動監視機能を監視制御システムの一部として備えている(図10)。

(6) 各制御装置盤にタッチパネルモニタ装備

各制御装置盤にはタッチパネルモニタを装備することでOPSと同等の監視・制御を可能としている。

(7) 国際標準言語、通信プロトコルのサポート

制御装置のプログラミング言語には国際標準であるIEC 61131-3を完全サポートし、通信規格としてはOPC(Object Linking and embedding for Process Control)とIEC 60870-5をサポートしている。

(注1) Ethernetは、富士ゼロックス株の登録商標である。

3.4 付帯設備：流入量予測機能

アッパーコトマレ発電所では、4mの水位幅で発電を行う必要があり、また、限られた水量を有効に使うため、ダムへの流入量に応じたきめ細かな発電が要求される。このシステムでは流域内5箇所の雨量局、2箇所の河川水位局から70MHz帯域のテレメータを用いて雨量、水位を定期的に収集し、過去の雨量、水位の実績からダムへの流入量を予測する流入量予測システムを構築している。

図11に流入量予測機能の画面例を示す。

4. む す び

可変速揚水発電システムは、国内外での導入が加速され、市場拡大が見込まれている。今後は定期的な点検などを通じて回転子の信頼性を確保するとともに、高速大容量可変速揚水発電システムの保守技術を蓄積していく。また、安定した電力供給のために、水力発電監視制御システムの重要性も高まっている。三菱電機は、日立三菱水力株と協力し、これまでのプロジェクトで得られた経験を活かし、今後とも水力発電分野における電力安定供給に貢献していく所存である。