

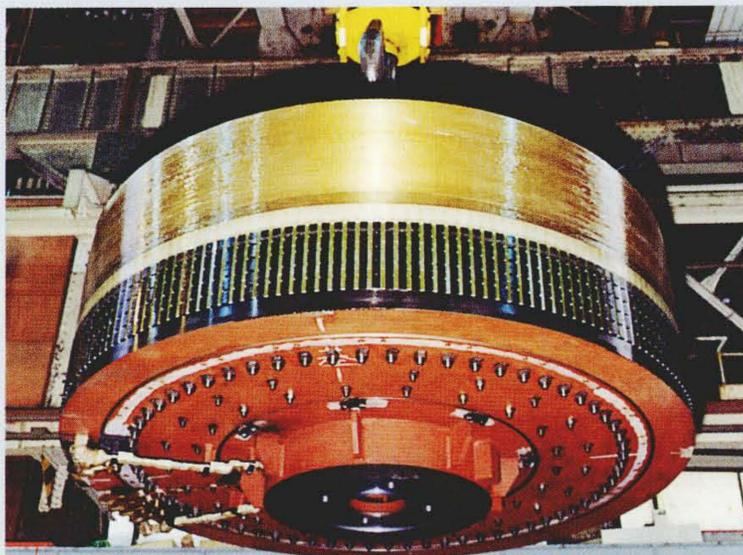
高度化する揚水発電技術の動向

Trends in Pump-Turbine and Generator-Motor Technology for High Head, Large Capacity Pumped-Storage Power Plant

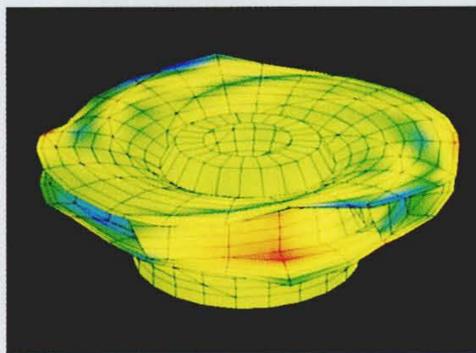
玉造貞一* Teiichi Tamatsukuri

高橋容二** Yōji Takahashi

(a) 最高試験落差1,500 mまで可能な実落差・実揚程試験設備



(b) 300 MW, 600 r/min相当の可変速発電電動機の回転子モックアップモデル(中部電力株式会社との共同研究)



(c) 有限要素法によるランナ振動モード解析

高度化する揚水発電技術 より高い揚水発電技術の開発のため、さまざまな試験・研究設備を駆使した検証を行っている。

揚水発電は、ピーク電力需要への優れた即応性を発揮するとともに、電力の大規模貯蔵と電力システムの経済的運用に役立つことから、その重要性はますます高まっている。電力システム規模の増大に伴い、揚水発電所の大容量化も図られる傾向にあり、経済性の向上をも考慮に入れてポンプ水車の単機容量増大化、高落差化、および高速化の技術開発、ならびに発電電動機の高速度・大容量化の技術開発が推進されている。現在、東京電力株式会社葛野川発電所では、単機容量400 MW、最高有効落差728 m、500 r/min、4台の揚水発電所の建設が進められており、日立製作所は、この1号機ポンプ水車、発電電動機的设计

に着手している。

また、1993年12月に関西電力株式会社大河内発電所4号機400 MW可変速揚水発電システムが運転開始し、実運用が始まった。このシステムの採用により、揚水運転電力の調整が可能となり、電力システム周波数を一定に維持するために役立っている。また、電力優先制御によって入力、出力の高速制御も可能なことから、今後の系統安定化機器としての活用も検討されている。現在、可変速システムのいっそうの高性能化、小型化のため技術開発を推進しつつあり、今後の適用拡大が期待されている。

* 日立製作所 電力事業部 技術士(電気部門) ** 日立製作所 電力事業部

1 はじめに

電力需要の増加に伴ってオフピーク時の余剰電力を貯蔵し、ピーク負荷時に優れた追従性を発揮する揚水発電所の建設も着実に増加し、国内の揚水発電設備容量は現在約20,000 MWとなり、全水力発電設備の50%を超えている。

揚水発電所は、1970年代からの大型火力、原子力発電の開発に伴って大容量化のニーズが高まり、経済性を追求する目的で高落差化も飛躍的に推し進められた。

1980年代に入ると夜間のAFC(Automatic Frequency Control)容量確保のため、揚水運転電力を調整可能にする新しい技術として、揚水発電設備の可変速化の研究を関西電力株式会社と共同で始めた。その成果を反映した実用機の1号機として関西電力株式会社大河内発電所(以下、大河内発電所と言う。)400 MW可変速揚水発電システムが1993年12月に営業運転を開始し、揚水発電は新たな時代に入った。

日立製作所は、揚水発電所の高落差化、大容量化および多機能化のニーズにこたえるべく新技術の開発に努め、現在までに累計100台、21,340 MWを納入するに至っている。

ここでは、ますます高落差化、高速化、大容量化および多機能化が求められる揚水発電機器の技術動向について述べる。

2 ポンプ水車の高落差・高速・大容量化への取組み

ポンプ水車の出力は落差と流量に比例する。同一出力に対して落差を高くすると流量は少なくて済むのに加え、ランナ周速を大きくすることができ水車、発電機は高速化、小型化が可能となる。また、ダムの高さや水路などの土木構造物の小型化も可能となることから、発電所単位出力当たりの建設費の低減が図れる。同時に、電力系統規模の増大とともに揚水発電所の大容量化も進められ、高落差化の技術開発とともに単機出力増大のための技術開発が行われてきた。

時代とともに高落差化、大容量化が図られ、現在、東京電力株式会社葛野川発電所向けポンプ水車では最高有効落差728 m、単機最大出力412 MWの建設が進められている(図1, 2参照)。一方、同じ出力、同じ落差でも回転速度を高くとることによって機械の寸法が小型化でき、建屋の縮小化や輸送寸法の縮小化が可能となるため、

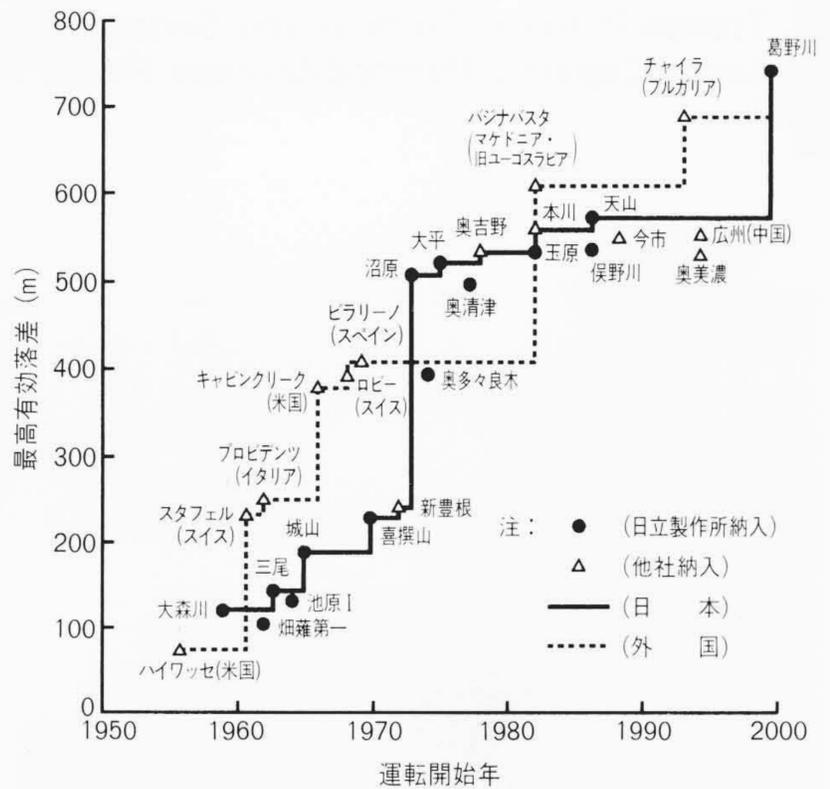


図1 ポンプ水車最高有効落差の推移
1970年代から落差が500 mを超える地点が続々開発され、現在は700 mを超える地点の建設が進められている。

ポンプ水車の高比速度化も着実に進展し、特に高落差領域では高い比速度が選定される傾向にある(図3参照)。

有効落差が600 mを超えるような超高落差ポンプ水車の実用化技術開発では、基本特性開発はもちろんのこと、ランナの強度、変動応力、水中振動特性などについて十分な検討が必要となる。このため従来の性能模型試験に加えて、実落差・実揚程模型試験装置により、実機運転

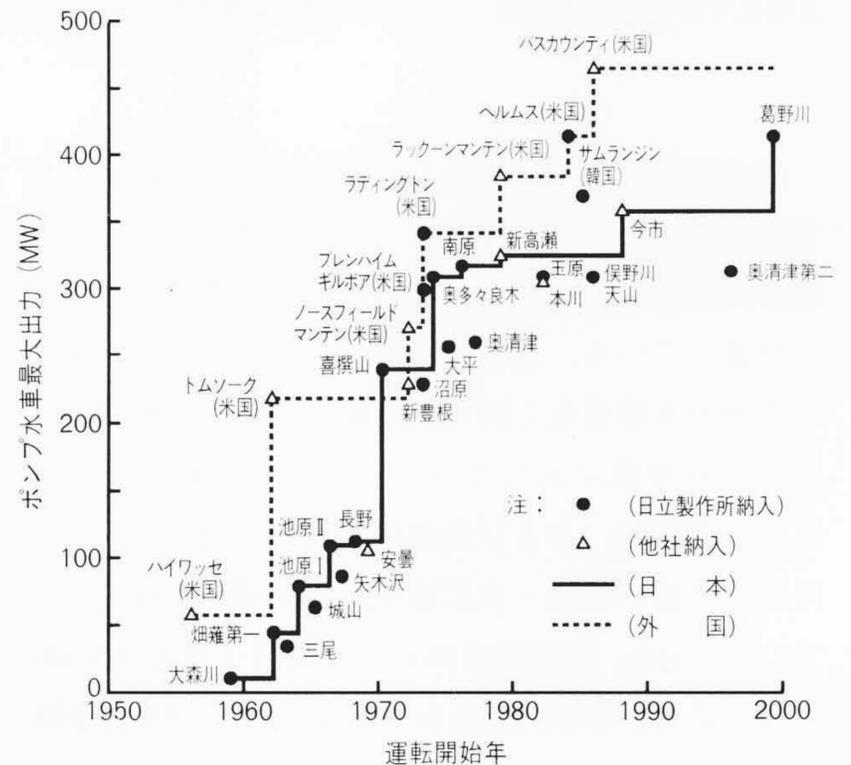


図2 ポンプ水車最大出力の推移
大容量化のニーズに伴って単機出力300~400 MWクラスの開発が主流を占めている。

に相当する状況下でのランナの変動応力や各部の水圧脈動、ランナと固定部カバーとの連成振動などを測定している。これによって案内羽根枚数、ランナ羽根枚数、ランナおよび上カバー、下カバーの形状などがどのような影響を与えるかを確認し、最適な設計を目指すとともに各種要素技術の再評価、確認試験などを行い信頼性の確保に努めている。

また、高落差地点では水圧鉄管や放水路の複数台主機に対する共用化が多くなってきており、これら水路系とポンプ水車との協調確認も重要な検討課題である。このため、模型ポンプ水車の完全特性を用い、負荷遮断、入力遮断など、さまざまなケースについて過渡現象シミュレーションを行っている。

3 高速・大容量発電電動機

ポンプ水車の開発と同様、発電電動機の高速度・大容量化も着実に進められてきた(図4参照)。近年の高速度・大容量化計画では、発電電動機の技術開発見通しが単機容量決定の重要な要素となりつつある。

高速度・大容量機になると、回転部の構造、強度、振動や通風冷却特性が重要課題となってくる。高速機の場合、回転子はリングリム方式やマッシュプロータ方式、界磁ポールの支持にはダイヤモンドテールや複列Tテール、ダブルテール方式が適用されている。しかし、大容量化に伴って強度や振動に対する要求条件が厳しくなり、また、輸送寸法が制約されることから、通風冷却や分解・組立・保守も含めたさまざまな条件のもとで構造の最適化を図る必要がある。

冷却性能に関しては、高速度・大容量化とともに軸方向鉄心の積み高さが高くなり軸方向風速分布の均一化が難しくなる。そのため、計算機によるシミュレーションおよび水流モデルによる模型試験により、冷却通風量の予測、風速分布の最適化が図られている。また近年、通風ブロワを省略し、ロータリムのダクトによるファン効果を利用したリムダクト通風方式が、保守簡素化のため高速機への適用も図られるようになってきている。

高速度・大容量機の新規地点開発に際しては、計算機による基本特性解析、応力、軸系解析はもちろんのこと、必要に応じて実物大コンポーネントモデルを製作し、実応力や機能の確認試験を実施することにより、いっそうの信頼性確保に努めている。

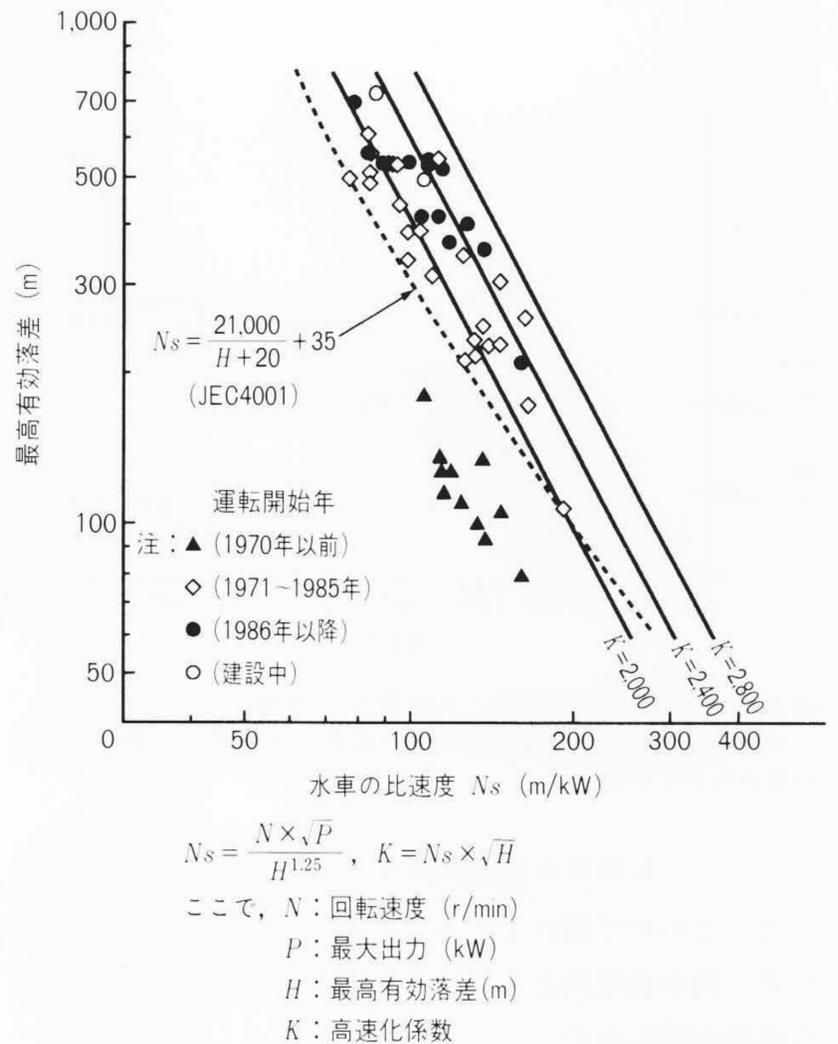


図3 世界の主なポンプ水車比速度 N_s と有効落差の関係
時代とともに高落差地点では比速度 N_s を高く選定し、高速化されるようになってきている。

4 可変速揚水発電システム

可変速揚水発電システムの最大の特長は、ポンプの軸入力回転速度の約三乗に比例することを利用して、回転速度を変化させることによって揚水運転中の電動機入力を調整し、AFC運転を可能にしたことである。

そのほかに、

- (1) ポンプ水車の変落差運転領域の拡大、部分負荷運転領域の拡大、効率向上
- (2) 揚水起動時、解列時の系統への電力変動の低減、調相運転中の損失低減
- (3) 回転体の慣性エネルギーを利用して高速励磁制御を行うことにより、系統との瞬時電力授受が可能となって系統安定度が向上などの特長がある。

日立製作所の可変速揚水発電システムは、当初から電力調整を目的として開発した電力優先制御を特長とし、マイクロコンピュータによる高速デジタル制御によって応答性を高め、さらに系統事故時でも優れた安定性を発揮するシステムとしている。大河内発電所4号機の運

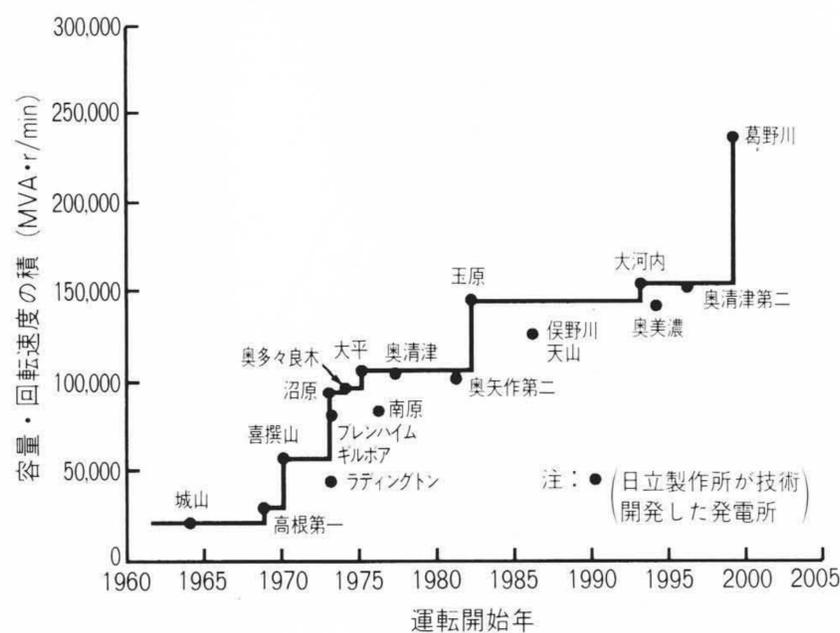


図4 発電電動機の高速度・大容量化の推移

ポンプ水車と同様、発電電動機の高速度・大容量化も着実に開発が進められてきた。

転により、有効電力指令に対する電力応答、AFCなどの性能がきわめて優れていることが実証され、新しい役割を担う揚水発電所として、今後の発展が期待できる貴重な成果が得られた。

可変速揚水発電は、系統の周波数調整機能に加え、有効電力、無効電力の急速応答性と系統事故時の動揺に対する優れた安定性を活用し、電力系統の運用にさまざまな貢献が期待できると思われる。今後の適用拡大のため、可変速発電電動機の高速度化、大容量化の技術開発も重要な課題である。中部電力株式会社との共同研究により、回転子のバインド方式に新素材を適用するなど、高速度対応技術の開発を行い、300 MW、600 r/min相当の可変速発電電動機の実物大外径の回転子モデルによる試験を実施して、実機適用への見通しを得ている。

さらに、大容量パワーエレクトロニクス素子の開発、可変速システムの高機能化・簡素化・小型化のための技術開発を推進し、高信頼性の確保と経済性の追求を目指している。

5 監視制御システム

近年のデジタル技術の進展は、制御装置のディジタ

ル化、計算機を活用した情報処理のネットワーク化などの技術革新をもたらし、監視制御装置の機能向上、信頼性向上を実現させている。揚水発電所の運用高度化に伴い、きめ細かな運転情報を迅速かつ的確に、わかりやすく提供する機能が重要になってきている。

このため、監視制御装置はマンマシン機能の充実を図り、CRTやフラットディスプレイなどを採用した運転しやすいマンマシンシステムを実現している。また、運転、保守業務の支援には機器の状態監視・異常予知システム、計算機の高度な情報処理能力を活用した故障診断、復旧支援システムなどの活用を推進している。

今後のシステムでは中央給電所～制御所間を含めたより広範囲なネットワーク化による情報関係の強化と、監視制御情報、設備保守情報など多様な情報の一元化や整理解析手法の確立、異常予知診断、保守点検の計画支援などのいっそうの機能充実が図られるであろう。

6 おわりに

揚水発電所の経済性向上のため、高落差化、高速度および大容量化とともに、多機能化のための可変速揚水発電システムの適用拡大へ向けての技術開発が求められつつある。また、落差が800 mを超えるような計画に対しては、二段ポンプ水車の性能開発、試設計を実施し、その実機製作の見通しも得ており実現が待たれる。さらに、海水を利用した電源開発株式会社沖縄海水揚水パイロットプラントの建設が進められつつあり、長年の研究成果を反映したポンプ水車も一部据付けが開始されており、将来の揚水発電の立地拡大のため、その成果が期待されている。

近年、電気の消費動向の変化に伴って冬季最大需要が増加し、揚水機器の運転頻度の増加、オーバーホール期間の確保難など保守上の新しい問題も出てきており、また、時代とともに熟練技術者の確保も難しくなっている。これらの社会環境の変化も考慮に入れ、経済性、信頼性の追求とともに運転、保守のしやすい揚水発電機器の開発に向けていっそうの努力が求められている。

参考文献

- 1) 千葉, 外: 水力発電機器の技術動向, 日立評論, 70, 8, 779~783(昭63-8)
- 2) 湊, 外: 可変速水力発電システムの開発, 電気学会誌, 107

巻, 3号(昭62)

- 3) 藤木, 外: 落差700 m・容量400 MW級超高落差ポンプ水車ランナ, 日立評論, 73, 11, 1083~1088(平3-11)