

MITSUBISHI

三菱電機技報 Vol.74 No.11

特集「最新の水力発電技術」

2000 11



目次

特集「最新の水力発電技術」

水力発電の位置付けと技術動向 前原史彦	1
水力発電所設備の変遷と展望 岡崎勝広・町野毅	2
水車発電機／発電電動機における最新技術 松枝泰生・落合務・後藤英之・富沢正雄・田宮洋一	6
水車／ポンプ水車の最新技術動向 清水昭二・岩崎純弘・坂元篤	11
水力発電所における監視制御システムの動向 石黒達也・町野利太	15
中小水力発電所向け一体形配電盤技術 大川雅博・村岡正隆・石黒達也	20
発電機励磁制御における技術動向 森田和宏・田中誠一	24
水車调速機制御における技術動向 三宮靖典・若林聖・中島満・藤森貞暢・曾我泰経	29
プラント状態監視システムの最新技術 町野利太・矢倉武宜	33
水力発電所建設における輸送・据付工事の最新技術 鈴木重則・塚田光政・川人真佐行	38
既設水力発電所への最新技術の応用 行木靖代志・佐野賢三・坂元篤	42
水カプラントの総合解析・検証システム 夏 隼鳴・森 健志・下村 勝	46
水系制御システム 大川雅博・監崎 章・佐藤裕二・長谷川誠一・内林 輝	50
東京電力(株)葛野川発電所2号機の概要 岡崎勝広・橘 浩司・岩崎純弘	54

特許と新案

「レジスト被覆膜材料、その形成方法とそれを用いたパターン形成方法 および半導体装置」「パターン形成材料」	59
「画像データ検索方法」	60

スポットライト

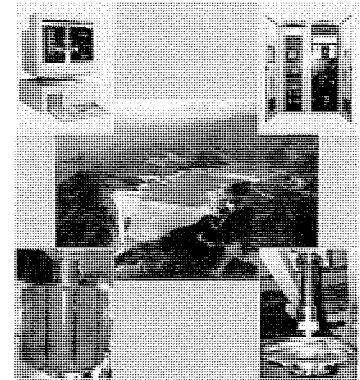
超小型・超高速次世代シーケンサ“MELSEC-Qシリーズ”	58
ダム流木／倒木処理システム	(表3)

表紙

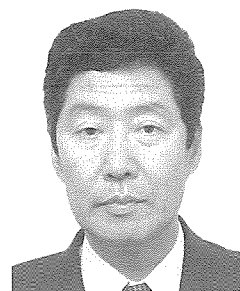
水力発電所を構成する最新機器

三菱電機(株)は、水車メーカーである三菱重工業(株)とともに、単段の揚水機としては世界最高落差となる東京電力(株)葛野川発電所2号機向けに、ポンプ水車(写真右下)、発電電動機(写真左下)、デジタル式自動電圧調整装置(写真右上)を始めとする主要な設備を納入した(中央の写真は葛野川発電所の上部ダム)。

また最近では、汎用計算機を使用した水力発電プラントの状態監視システム(写真左上)が適用されだしている。



水力発電の位置付けと技術動向



電力・産業システム事業所長

前原史彦

我が国のエネルギー問題は、1970年代のオイルショックを契機に石油資源の有限性が改めて認識されエネルギー構造の転換が叫ばれるとともに、長期的な視野に立った石油代替エネルギーの開発・導入が推進されてきた。特に、水力発電については、純国産エネルギーの主力でありクリーンで再生可能なエネルギーとしてその開発を推進することが、国の重要施策の一つとなっている。また、世界的に見ても、地球温暖化などの環境問題を背景に、水力資源のある東南アジアや中南米などで大規模地点の開発が進んでいる。

経済面では、水力は、建設費など初期の原価が割高であっても、長期的に安定・廉価な電気を供給することができる。現在の電気料金が20円/kW・h程度であるのに対し水力発電は7円/kW・h程度であり、水力による発電は経済的に有利である。

通商産業省・資源エネルギー庁の'99年3月末時点の国内包蔵水力調査結果によると、一般水力では2,721地点、最大出力1,213万kWの未開発分があり、平均出力は5,000kW以下で、今後、中小水力が主流になる傾向にある。発電方式としては、流れ込み式が地点数の約9割を占め、残りが貯水/調整式となっている。また、揚水発電では20地点、796万kWの未開発分がある。近年の電力需要の伸び悩みで揚水プラントの建設計画が先送りされる傾向にあるが、長期的には、火力・原子力のベース電源の効率的な運転に揚水発電所は必要不可欠である。

現在は“火主水従”時代、又は“原主火従”時代となっており、発電電力量構成比に占める水力の割合は約1割となっている。しかしながら、ピーク対応の貯水式水力、ベース電源の流れ込み式水力、又は夜間の揚水負荷など、それぞれの目的に合った運転により、電源構成が複雑化する中で、今後とも水力の価値は一層重要なものになると考える。

火力・原子力同様、水力発電の分野においても、電気事業法の改正に伴う卸売り電力市場の自由化などの影響から、建設・保守費など一層のコスト低減が必要となっている。特に中小水力では、システムの合理化・簡素化を推進し、

また、従来の電力仕様にとらわれない汎用品の適用や規格の見直しなどでコストダウンの実現を目指している。これらの検討は、発電所の重要度を考慮した上で、ユーザーである電力会社の協力の下で進めている。

また技術面では、揚水発電所に見られる発電電動機、ポンプ水車の高落差(700m超級)・高速(500min⁻¹超級)・大容量(500MVA級)化などの技術が確立しつつあり、国内メーカーの揚水技術は世界のトップクラスと言える。また、制御・保護技術についてもハードウェアやソフトウェアの最新技術を適用したガバナ制御・励磁制御システムが適用されており、従来の信頼性を確保しながら付加価値の高い機能を提供している。

予防保全の面では、発電所設備の寿命診断結果や劣化状況などをタイムリーにユーザーに提供し、また、既存設備の流用と更新の範囲を経済的観点から検討しながら更新提案を行っている。また、水レス・油レスによる補機類の省略、樹脂軸受の採用、一体型配電盤の適用など、コスト低減/保守性向上などを積極的に提案している。

今後は、発電機や水車の高速・大容量化の更なる技術確立、中小水力の経済性追及に加え、監視制御・保護機能の高付加価値化、運転・保守の省力化など、デジタル技術・ネットワーク技術を活用したITの応用が必要と考える。また、今後、小水力は、トータルエネルギー効率の向上を目指した分散電源との共存や風力・太陽光とのハイブリッドシステムとしての運用などが求められる。

一方、自然環境への配慮という点では、水力発電所のダム建設は、イヌワシやクマタカなど希少動物の保護に十分配慮して進められており、今後とも水力発電は“自然との共存”を目指した発電設備でなければならない。

この特集では、最近の水力発電が置かれている状況を踏まえ、三菱電機の取組と最近の技術成果について紹介する。

今後とも、水力発電事業の市場動向、市場ニーズを的確に捉え、最新技術を取り入れた製品の開発を行い、電力の安定供給に貢献できるシステムを提供していく考えである。

水力発電所設備の変遷と展望

岡崎勝広*
町野 毅**

要 旨

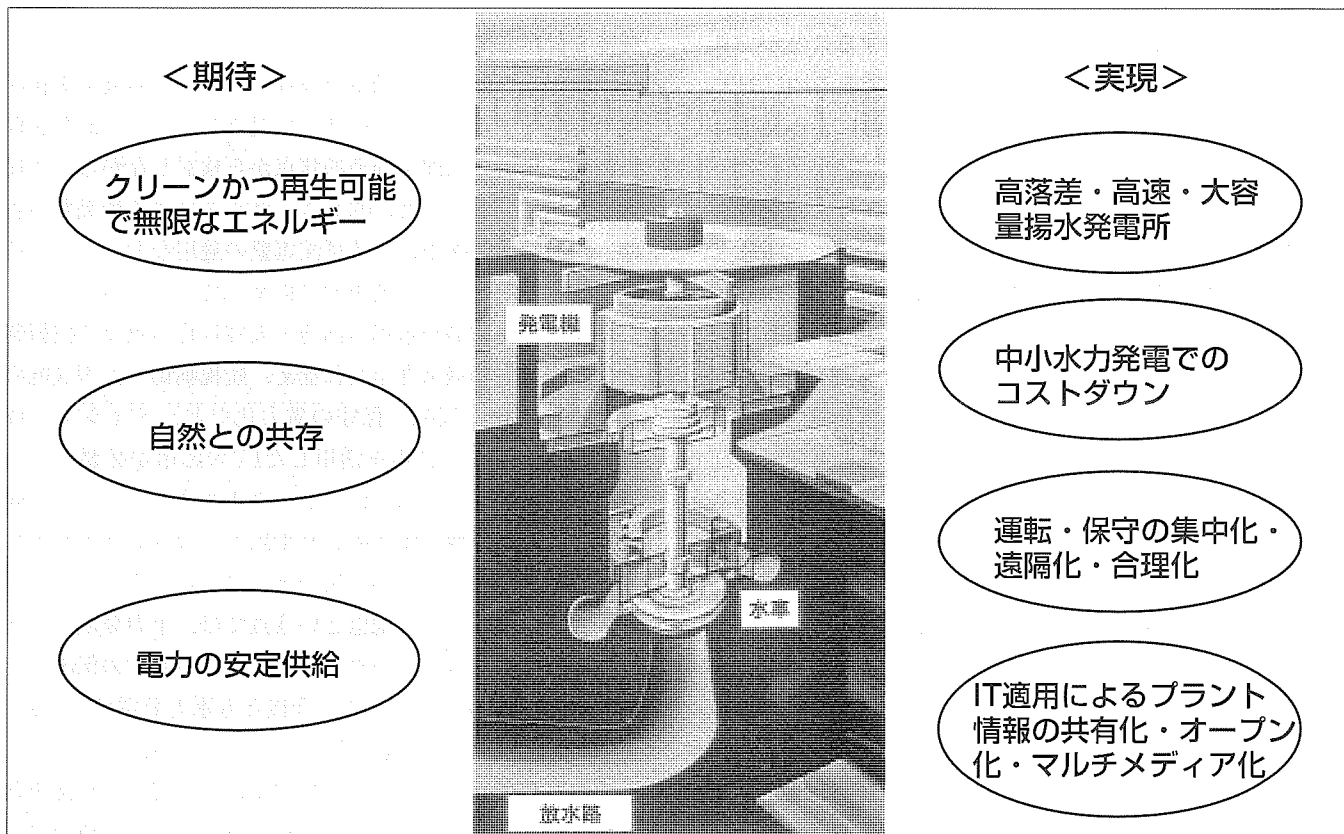
水力発電所は国産エネルギーの主力であり、クリーンかつ再生可能なエネルギーとして、数百kWの小水力から500MVAクラスの大容量揚水まで、種々の目的に合った役割を果たしている。特に揚水発電所は、電力系統の負荷の平滑化という重責を担っており、今後の電力需要の増加に伴ってますますその重要度は増している。

また、三菱電機の揚水発電所の単機容量は、1990年代前半までは367MVA(東京電力・新高瀬川)が最高であったが、'98年運開の関西電力・奥多々良木の400MVA、2000年運開の国内最大容量の東京電力・葛野川の475MVAと、近年大容量化が進み、その大容量化技術の進歩には目を見張るものがある。また主機の回転速度についても、400min⁻¹クラスから500min⁻¹に移り、“更なる高速大容量化”の時代に突入したと言える。

また水力発電所は、早くから一人化・無人化による監視制御の自動化・省力化が進められてきた。'50年代の一人化制御を経て'60年代には遠方監視制御化によって完全自動化・無人化を実現した。その後もデジタル機器の応用によって監視制御装置の高機能化が進み、また保護も含めたトータルデジタルシステムも構築されている。

また、中小水力発電所に対しては、従来分散システムであったシーケンサ／ガバナ／AVRを1 CPUで実現した一体型配電盤が今後の中小水力制御装置の主力機種となり、さらに、汎用コントローラを適用したシステムも実用化されつつある。

本稿では、近年の水車、発電機の高速・大容量化を中心とした動向と監視制御のシステムの技術動向を紹介するとともに、今後の展望について述べる。



水力発電所への期待と実現

水力発電所はクリーンかつ無尽蔵なエネルギー源であり、自然との共存、電力安定供給への貢献など、地球環境とエネルギー問題のバランスに対する期待が大きい。それらを実現するために大容量揚水発電から中小水力まで種々のニーズと目的に合ったシステムを提供するとともに、水力発電業務の合理化、コストダウン、さらには最新技術を適用したシステムの高度化などを実現しなければならない。

1. ま え が き

前述したとおり、ポンプ水車、発電電動機は更なる“高速大容量化”の時代に突入しており、また、落差も世界最高落差の700m級に達している。プラントの監視制御はデジタル技術の進歩によって高機能化されているが、一方、コストダウンをねらった機能の簡素化・集約化も進んでいる。また保護機能についても、ハードウェアからソフトウェアに移行しており、監視機能を充実させている。

本稿では、ポンプ水車、発電電動機の変遷及び監視制御の技術動向を具体例とともに紹介する。

2. 発電機の技術の変遷

2.1 発電電動機の単機容量の推移と技術の進展

三菱電機が発電電動機の単機容量の推移を図1に示す。1975年に運開した関西電力(株)奥多々良木揚水発電所に300MVAクラスの発電電動機を納入し、その後2000年運開の東京電力(株)葛野川揚水発電所納入の475MVAまで容量的には300~400MVAクラスが主流となっている。また発電電動機的设计難易度を表す指標として“容量×回転速

度”が用いられるが、葛野川 $237,500\text{MVA} \times \text{min}^{-1}$ は、従来の実績を大きく上回る世界最大級の記録品である。発電機技術も通風、スラスト軸受、剛性構造などの性能向上に向けた検証・解析を積み重ね、葛野川の容量×回転速度を上回る発電電動機的设计・製作に向けてTEHD(熱流体潤滑)理論によるスラスト軸受解析、FEM(有限要素法)による構造物剛性解析や回転部強度検討を行っている。

2.2 新技術適用による発電機仕様の簡素化

中小容量の発電機に対しても、新技術の適用による発電機仕様の簡素化・小型化、保守性/経済性の向上などを積極的に提案している。特に樹脂軸受については、軸受損失の減少、起動トルクの軽減、長寿命化など、発電電動機も含めて今後のスラスト軸受の主流になると期待する。特に、樹脂軸受は軸受損失の低減、スラストスプリングは荷重調整作業の簡素化、リップスプリングは保守点検周期の延長というメリットがある。

3. 水車の技術の変遷

3.1 高落差・大容量化の推移と技術変遷

三菱のポンプ水車は、第一号機を'69年中部電力(株)高根

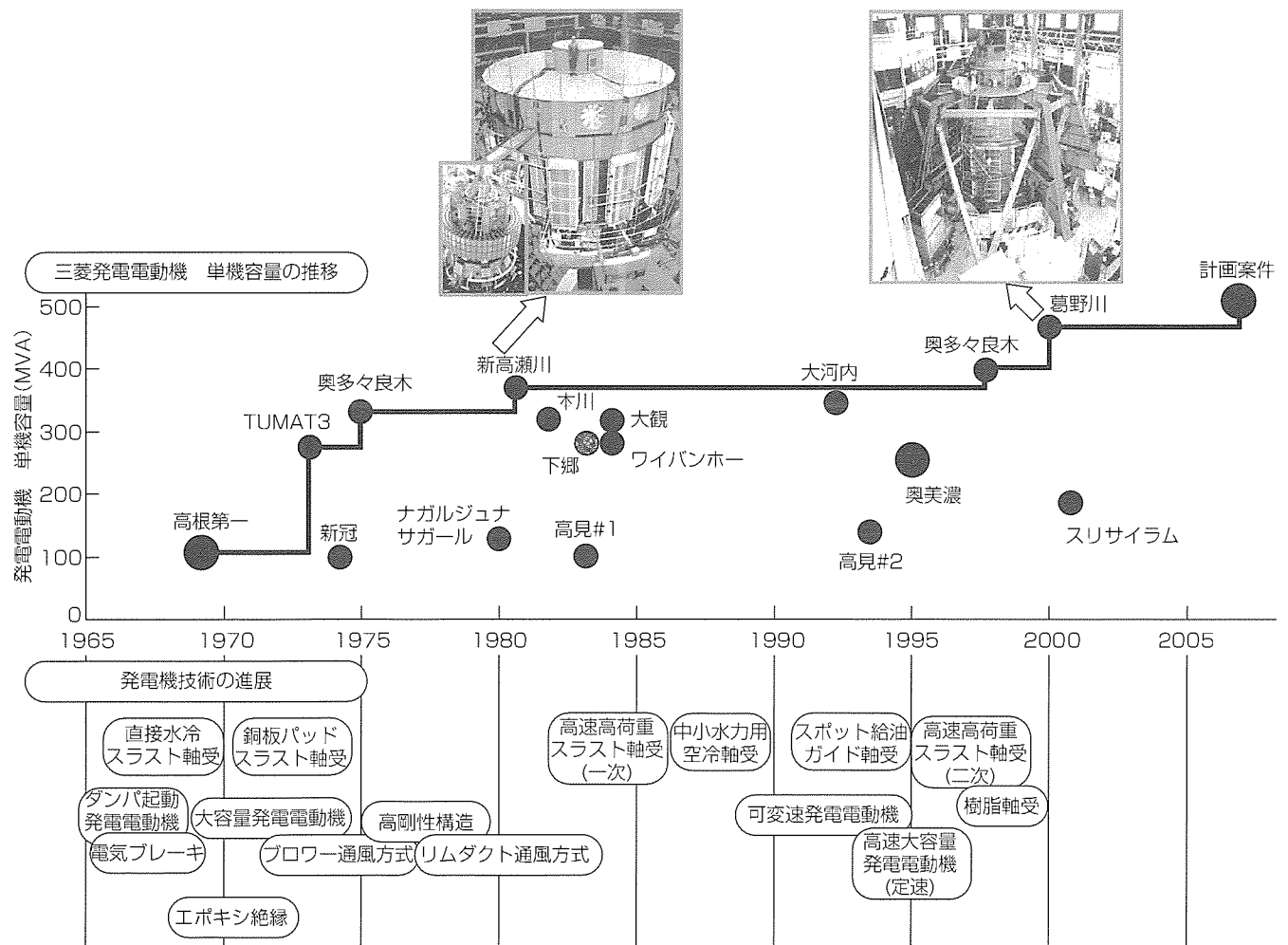


図1. 三菱発電電動機の単機容量推移と技術の進展

第一発電所に納入したが、落差は150m以下であった。その後、'75年には関西電力(株)奥多々良木発電所に落差400m級のポンプ水車を納入し、'82年には当時国内最大容量及び最高落差のポンプ水車をそれぞれ東京電力(株)新高瀬川発電所、東京電力(株)玉原発電所に納入した。以降500~600m級の落差の揚水発電所の実績を経て、2000年6月に、世界最高落差である700m超級のポンプ水車を納めた東京電力(株)葛野川発電所が開業した。また単機出力も、'75年運開の奥多々良木発電所以降、300~400MWクラスのポンプ水車を納め、前述の葛野川が412MWで国内最高出力に至っている。これらの変遷を図2及び図3に示す。これらの実績は、鑄造欠陥のないランナ製造技術や流動解析技術による水圧脈動/キャビテーション特性の改善の成果である。さらに、FEMによる剛性評価技術、ランナ固有振動特性解析技術などを駆使し、振動やランナ応力を低減し高落差・大容量ポンプ水車の技術を確立した。

3.2 性能向上に向けた新ランナの開発

三菱重工業(株)は、ポンプ水車の高効率化、運転範囲の拡大、水圧脈動低減、ランナ振動応力低減を目指して、新コ

ンセプト設計を適用したスプリッタベーン付きランナを開発した。性能模型試験を実施し、従来設計ランナからの性能改善を確認した。このスプリッタ付きランナは、高効率化、運転範囲の拡大とともに、実機運転特性上重要なポイントとなる水圧脈動の低減、及びランナ振動応力低減等に有効であることが検証された。今後更なる高落差・大容量のポンプ水車の実現が可能となった。また、一般水力への適用も可能なことは言うまでもない。

3.3 予防保全工事への新技術適用

経済性と保守性の向上を目指し、既設水車に対しても、機器本体の構造の簡素化、水/油レス化の取組がなされている。主なものとして、カプラン水車、小容量デリア水車への電動サーボモータの適用、セラミックを使用し給水を省略したセラミック封軸装置などがある。いずれも補機の簡素化が実現でき、保守性の向上、ランニングコストの低減を図ることができる。

4. 監視・制御・保護システム

水力発電所の監視制御システムは'70年代に入りデジタル装置が導入され、当初はシーケンスコントロール及び二次調整装置への適用に限界であった。その後、ハードウェア、ソフトウェアの技術進歩に伴い、ガバナやAVRなどの一次調整装置及び保護リレーへその適用が拡大された。現在ではすべての監視・制御・保護機能にデジタル装置を適用していると言っても過言ではない。

近年では中小水力への一体型配電盤の適用が普通となり、当社も、'99年度に、改修工事1件を含む7案件8セットを出荷した。現在順調に稼働している。またテレコンとは別に、電力所のパソコンを使ってプラントの運転状態を監視できる“保守支援システム”を一体型配電盤と組み合わせる製品化した。これは、発電所にサーバを設置し、制御装置から収集したデータを電力所や制御所などで閲覧できるもので、故障発生時には現場から遠隔地にいながらこれまで以上により的確な判断が可能となる。今後このようなシステムに対する需要が伸びていくと思われる。保護リレーについては、現世代のデジタルリレーをベースに保守性・操作性を向上させた次世代デジタル保護リレーの製品化を2000年度に完了させる予定である。このデジタル保護リレーには、電力規格B-402準拠のMELPRO™-CHARGEと、若干仕様を簡素化したMELPRO-DASHの二つのシリーズがあり、海外も含めて大容量プラントから中小プラントまで適用を図っていく。この次世代デジタルリレーは、汎用パソコンを使った遠隔監視が可能であり、客先ニーズに合わせた保守システムが提案できる(図4)。

5. 電力系統への寄与

近年、電源の遠距離化・集中化によって長距離大電力の

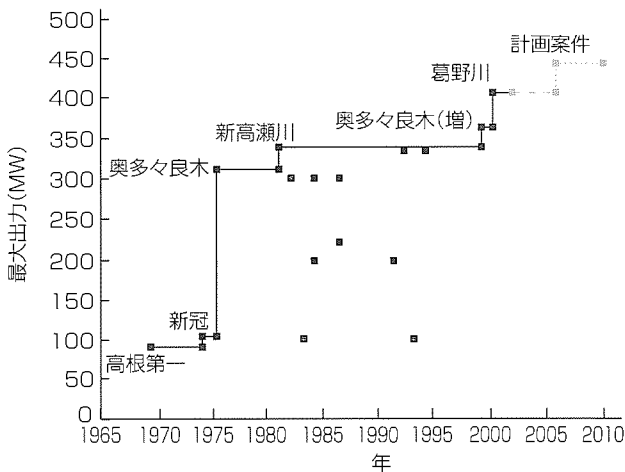


図2. 三菱水車の最大出力の推移

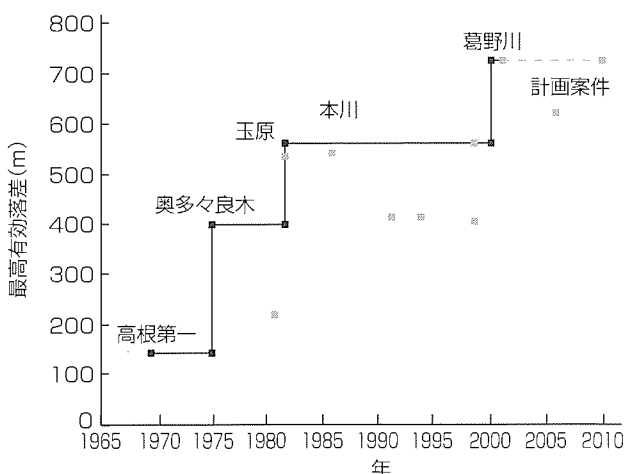


図3. 三菱水車の最高落差の推移

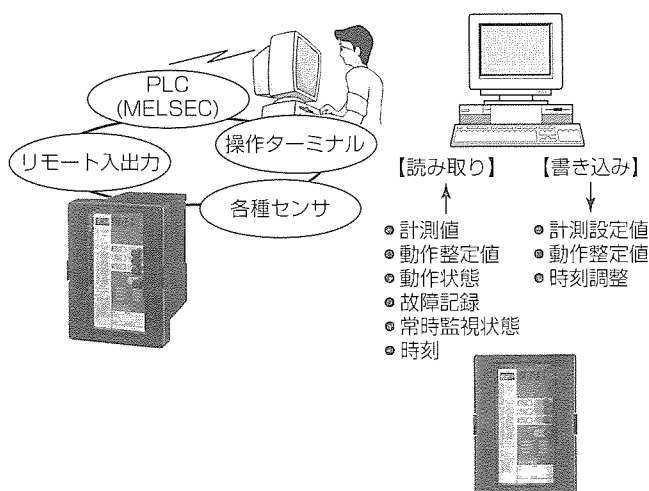


図4. 次世代デジタルリレーの遠隔監視イメージ

安定な送電が重要な問題となっている。特に需要家から遠隔地にある水力発電所は、送電電圧の維持が不可欠である。当社はこの“送電電圧の維持”を目的に励磁装置にその機能を組み込むことが可能な高圧側電圧制御方式の開発を行っており、デジタルAVRのオプション機能として非常に有効である。

一方、発電所、特に複数台ある揚水発電所では、発電電動機や励磁装置などの電気系の挙動のみならずポンプ水車、水路系などの機械系の挙動が電力系統に及ぼす影響は無視できない。これらの問題を解決するため、研究所と協力し、ポンプ水車、水路系、発電電動機、励磁装置(可変速システムを含む。)及び電力系統のすべてを詳細に模擬した瞬時値ベースの解析プログラムを開発した。このプラント総合解析・検証システムにより、従来は不可能であった電気系・機械系全体の詳細な解析が可能となったばかりでなく、その結果を制御／保護装置に反映させることによって実機

の品質向上が期待できる。

6. 輸送・据付工事

機器の輸送・据付工事に関しても、技術の伝承と品質の確保を図りつつ、合理化、コストダウンが求められている。これまでは、機器の設計と輸送・据付工事は独立したものとして考えられてきた。しかし、輸送・据付工事の合理化策として工具・工法の開発を考えた場合、これらは機器構造の改良と相互に関連し、結果的に機器設計部門と工事部門が協力してこの合理化に取り組まなければならない。当社では、発電電動機の主要重量部品について機器製作と輸送・据付けのトータルコストが最小となる機器分割を実現するとともに、ロータポール挿入時のダブルキー打ち込み機の開発、下部ブラケットとベースの一体化によるブロック工法の採用などで輸送・据付工事の合理化を実現した。今後とも水力プラント工事の品質確保と更なる合理化に向けて機器製作部門と工事部門との連携を進めていく必要がある。

7. むすび

以上、水力発電設備の変遷と今後について述べたが、火力／原子力が主流の時代に、クリーンかつ無尽蔵な水力のエネルギーは人類として決して絶やすことはできないエネルギー源である。水力発電ビジネスに携わる人間として、この“環境”と“エネルギー”のバランスは国内だけの問題ではなく世界規模で取り組むべき問題であると同時に、水力発電システムは21世紀に引き継いでいくべき重要な我々の財産であると考えます。水力ビジネスの拡大・発展のために、今後とも最新技術を取り入れ、安定かつ廉価な電力の供給に向けて努力していく所存である。

水車発電機／発電電動機における最新技術

松枝泰生* 富沢正雄**
 落合 務* 田宮洋一***
 後藤英之*

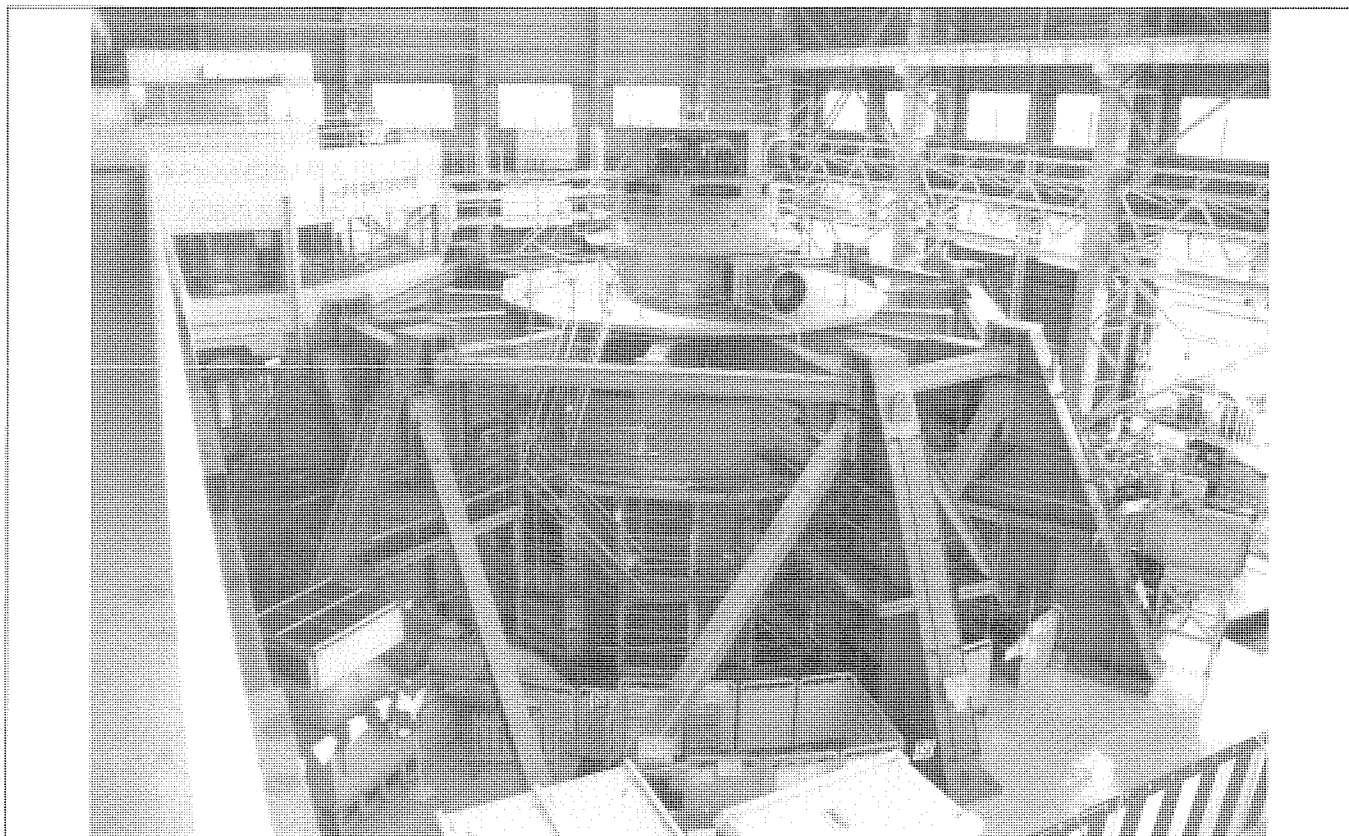
要 旨

近年の国内揚水発電所の建設計画は、開発地点の制約や建設コストの削減のため、発電機単機当たりの大容量化や高落差化が押し進められている。三菱電機では、高速大容量発電電動機的设计・製造技術の確立のため、各種開発を実施した。高速大容量発電電動機では、高速心力に対応するため、回転子リムへの780MPa級高張力鋼板の適用及び新形ダブテールの開発を行い、回転部の信頼性を確認した。通風冷却技術に対しては、通風解析精度の向上を目的とした通風解析手法の見直しを行い、ラジアルファン+リムダクトの併用による自冷通風の適用範囲を拡大することに成功した。これにより、従来の設計手法では必要であった電動ファンの省略が可能となった。また、スラスト軸受では、軸受信頼性向上を目的とした高精度軸受特性解析プログラ

ムの開発と500MVA級発電電動機の実物大モデルによる軸受検証試験を実施し、軸受の信頼性及び開発したプログラムの有効性を確認した。これらの開発を通し、高速大容量発電電動機的设计・製造技術を確立し、高い信頼性があることを確認した。

また、中小容量機においては、樹脂軸受の適用及びスラストスプリングの適用範囲拡大を行うとともに、構造物の最適化設計手法である遺伝的アルゴリズム(GA)の適用を行い、補機の簡素化、調整作業の簡略化及び構造の最適化を実現した。

これらの成果を基に、今後も信頼性の高い水車発電機／発電電動機を提供できるものと考えている。



高速大容量発電電動機

国内揚水計画の高速大容量化に対応し、500MVA級揚水発電機的设计・製造技術の開発を完了した。この成果を2000年6月に連関した東京電力(株)葛野川発電所納め2号発電電動機に適用し、良好な結果を得た。

1. ま え が き

近年の国内揚水発電所の建設計画は、開発地点の制約や建設コストの削減のため、発電機単機当たりの大容量化や高落差化が推し進められている。水車発電機/発電電動機的设计難易度は容量と回転速度の積で表されるが、2000年6月に運開した東京電力(株)葛野川発電所納め2号発電電動機及び今後計画されている発電電動機は、従来の実績を大きく上回る設計難易度となる(図1)。

本篇では、高速大容量発電電動機の開発を通して導入した新技術を紹介するとともに、最近の中小水力に適用した最新技術について紹介する。

2. 発電電動機の最新技術

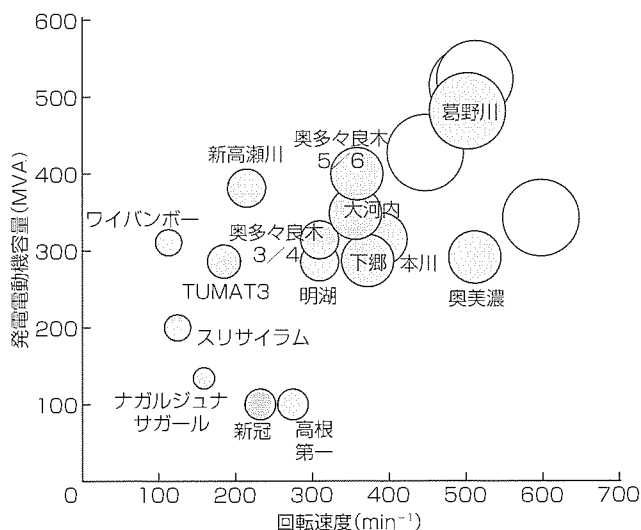
高速大容量発電電動機的主要な開発課題を表1に示す。

2.1 回転部強度

発電電動機の高速度大容量化に伴い、回転子各部に作用する遠心力が増加する。この高速遠心力に耐え得る回転子各部の構造検討及びモデル試験による健全性確認を実施した。

2.1.1 780MPa級高張力鋼板の適用

回転子リムは、外周部にダブテールと呼ばれる締結部を介して磁極を支持するとともに、軸方向の層間にはダクトを設けることでリムダクトと呼ばれる通風回路を形成する役割を担う重要部位である。高速大容量機では、回転速度の高速化に伴い磁極及びリム自身の遠心力が増加し、無拘束速度時の静的強度及び起動停止の繰り返しに伴う疲労強度が厳しくなる。このため、高速大容量機の回転子リムに



円の大きさは容量×回転速度を表す。白抜きは計画プラント。

図1. 発電電動機的设计難易度

表1. 高速大容量発電電動機的主要な開発課題

回転部強度	高速遠心力に対応した回転部構造の開発
通風冷却	容量及び出力係数の増加に伴う冷却特性改善
軸受	信頼性の高い高速高面圧スラスト軸受の開発

は水圧鉄管等に用いられている引張強さ780MPa級高張力鋼板の適用を計画した。

リムの強度解析にはFEM(有限要素法)を用い(図2)、高張力鋼板の疲労強度試験結果と比較することで、 10^5 回の繰り返し荷重に対する信頼性が確保できることを確認した。

2.1.2 新形ダブテール

回転子のダブテール部は、磁極の遠心力荷重を受け持つ重要部位である。高速大容量機は極数が少なく1極当たりの磁極質量が大きくなるため、高速遠心力に耐え得る新形ダブテールの開発を行った。新形ダブテールは、FEMによる解析を実施して、ダブテールスロット底での応力集中を緩和する最適な形状を選定し、実物大モデルによる疲労試験(図3)を通して信頼性を確認している。

2.2 通風冷却

三菱電機では1981年に製作した四国電力(株)本川発電所納め発電電動機以来、発電電動機にはリムダクトによる自冷通風を適用している。今後の高速大容量機は固定子/回転子巻線の冷却に対する必要風量が増加するが、通風解析精度の向上を目的とした通風解析手法の見直しを行い、ラジアルファン+リムダクトの併用(図4)による自冷通風の適用範囲を拡大することに成功した。これにより、従来の設計手法では必要であった電動ファンの省略が可能となった。

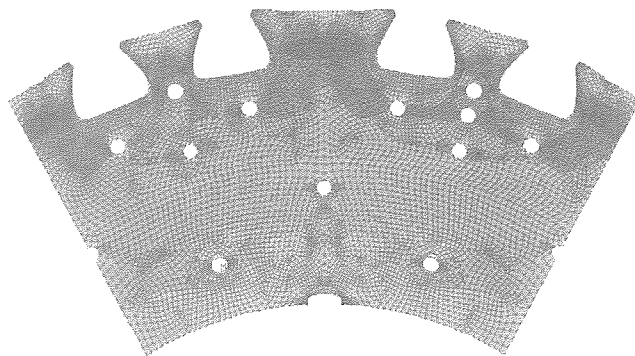


図2. リム強度解析

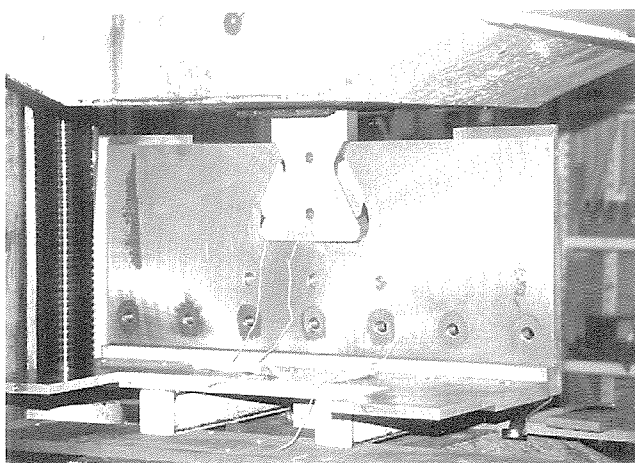


図3. 実物大ダブテール強度検証

この成果を反映し、葛野川2号機では従来の実績を超える出力係数10.1を実現した。なお、出力係数とは、機械の大きさに対する出力の割合を示す指数であり、定格出力kVAを固定子鉄心内径(m)の2乗、鉄心積厚(m)及び回転速度(min^{-1})で除したものである。

2.3 スラスト軸受

スラスト軸受は、発電機の構成部品の中でも最も信頼性が要求される部位の一つである。高速大容量機は回転速度が速く、従来の実績と同じPV値で軸受を設計した場合、従来よりも軸受の面圧を下げた設計となる。しかし、軸受を低面圧で設計すると軸受の外形寸法が大きくなり、軸受損失の増加につながることから、葛野川2号機及び今後的高速大容量機では軸受損失低減を目的として高面圧設計として計画した。このため、これらプラントのスラスト軸受は従来の実績を大きく超えるPV値となる(図5)。また、軸受は、定常運転状態だけでなく起動停止時や水圧推力が急激に変化する等の過渡状況下の信頼性を確保する必要がある。このような背景から、当社では以下の開発を実施した。

- (1) 熱弾性流体潤滑理論を用いた軸受特性解析プログラムの開発による特性解析精度の向上(過渡時を含む。)
- (2) 500MVA級発電電動機の実物大・実負荷検証試験装置による過渡特性を含めた検証試験の実施

なお、当社では、揚水機向けのスラスト軸受には裏金に銅板を用いた2層式スラスト軸受(銅板パッド)を標準的に採用している。ホワイトメタルと銅の線膨脹係数が近く、銅を裏金に用いた軸受に比べてホワイトメタルの熱疲労に対する信頼性が向上することを確認している。

2.3.1 軸受特性解析プログラムの開発

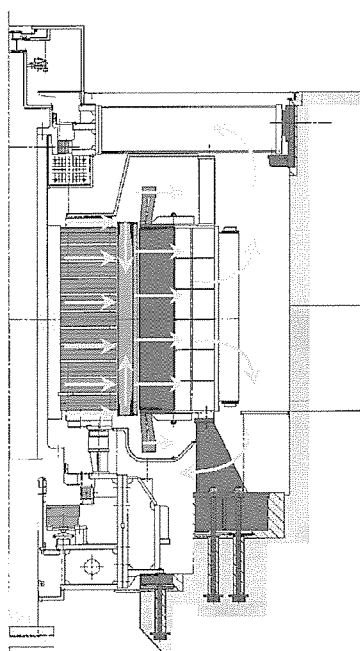


図4. ラジアルファン+リムダクト通風

計算機の性能向上により、以前は計算時間の関係から困難であった油膜温度場の三次元解析及び油膜の特性解析とセクタの熱荷重変形解析を練成した特性解析プログラムの実現が可能となった。開発したプログラムの特長を以下に示す。

- (1) 油膜の温度場への三次元エネルギー方程式の導入及びセクタ伝熱・熱荷重変形の連成解析により、セクタ内への熱の流れ及びセクタ変形形状の計算精度が向上し、軸受特性解析精度が向上
- (2) スラストセクタ内の伝熱解析を非定常解析とすることで、定常運転状態だけでなく起動停止時や負荷遮断時等の過渡的な状況下における軸受性能も解析可能

2.3.2 実物大モデル検証試験

500MVA級発電電動機実機と同一サイズの実物大・実負荷検証試験装置を製作した(図6)。検証試験では、スラストセクタ表面に熱電対及び渦電流式のギャップセンサを埋め込むことで、発電機運転中の軸受表面温度や油膜厚さの変化を連続計測した。また、定常運転時だけでなく起動停止やオイルリフトON/OFF時等の過渡状態の特性検証も実施した。検証範囲は、今後計画されている高速大容量

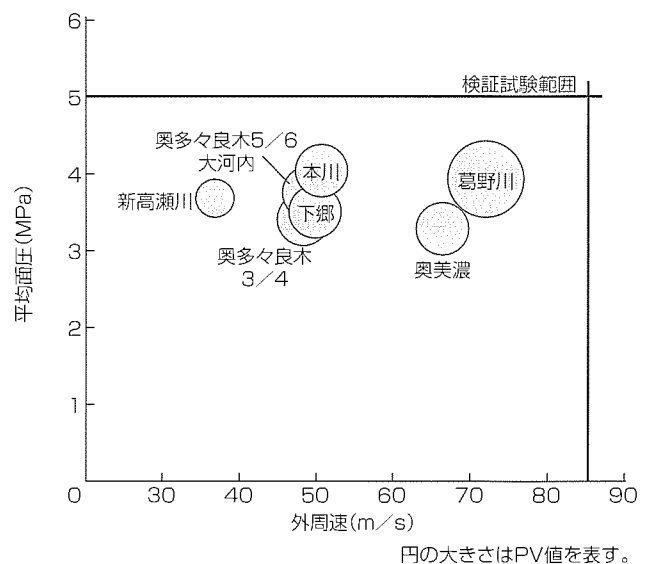


図5. スラスト軸受検証試験範囲

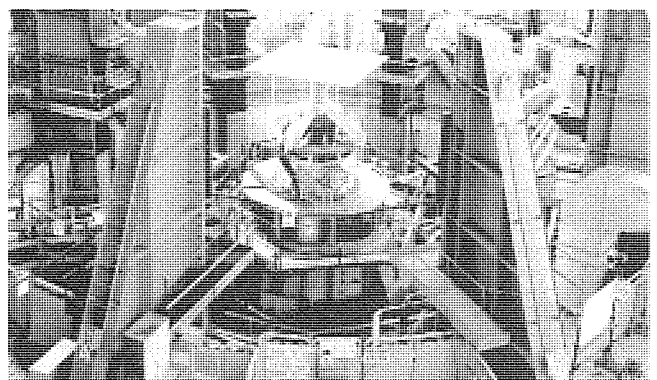


図6. 実物大スラスト軸受検証試験装置

発電電動機のスラスト軸受の試設計を行い、すべてのプラントの運転条件が含まれるように設定した。

2.3.3 検証試験結果と解析精度の確認

実物大モデル試験結果と解析プログラムによる解析結果との比較の一例として、回転速度 500min^{-1} 、平均面圧 3.9MPa における軸受表面温度分布と油膜厚さ分布を図7に示す。これから、解析と実測はよく一致しており、十分な解析精度を持っていることが確認できた。なお、過渡状態においても、軸受が十分に安定であるとともに、解析と実測がほぼ一致することを確認している。

軸受特性解析精度の向上及び過渡状態における軸受の特性の把握により、信頼性の高い軸受の設計が可能となった。また、これらの成果を基に、過去に製作した3ディスク支持方式等の旧設計軸受を最新構造へ改修する等の活動を行い、軸受の信頼性向上に努めている。

3. 中小容量水車発電機の最新技術

近年の中小容量水車発電機の最新技術として、樹脂軸受の開発、スラストスプリングの適用拡大、及び遺伝的アルゴリズム(以下“GA”(Genetic Algorithms)という。)の適用について以下に紹介する。

3.1 樹脂軸受の開発

これまで滑り軸受のしゅう(摺)動面材料に適用してきたすず系の合金であるホワイトメタルに比べて摺動性・耐熱性・耐摩耗性に優れた材料であるPEEK(ポリエーテルエーテルケトン)を摺動面材料に用いた樹脂軸受の開発を完了し、実機に適用した。PEEKはホワイトメタルに比べて摺動性・耐摩耗性に優れるとともに、テフロン等の他のプラスチック素材に比べ、高温時の機械強度及びクリープ特性に優れる特長を持っている。樹脂軸受の特長を以下に示

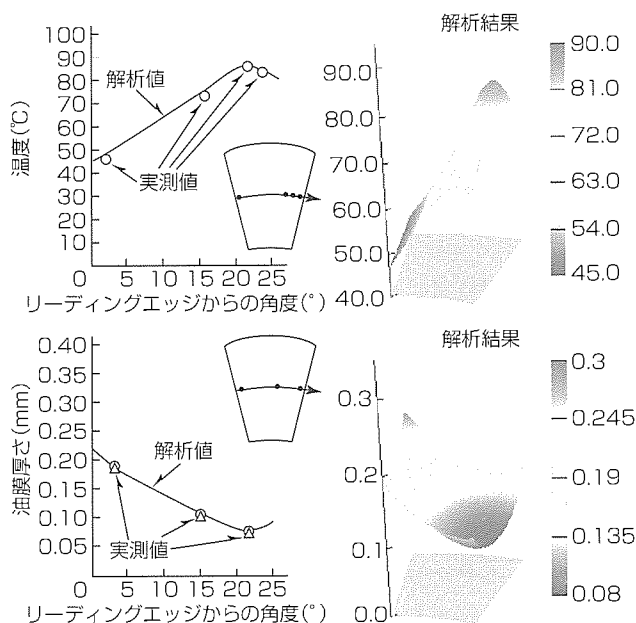


図7. 解析と実測との比較

す。

(1) 樹脂軸受を適用することで従来よりも高面圧での設計が可能となり、軸受損失を低減することができる。

(2) 摺動性及び耐摩耗性に優れることからオイルリフタの省略可能となる範囲が拡大し、補機を簡素化することができる。

また、当社では、充てん(填)材の違いによって2種類の樹脂材料を用意し、用途に応じて最適な樹脂を選定している(表2)。

一般に樹脂は金属との接着性が悪く、樹脂軸受の開発課題の一つとして裏金との接合方法が挙げられる。当社では、裏金の表面に設けたブロンズ粉末の焼結層に樹脂を高圧含浸することで、樹脂自身の機械的強度によって接合する方法を採用し、十分な接合強度が得られることを確認している。

なお、樹脂の接合技術等の要素技術は大同メタル工業㈱で開発されたものであり、水車発電機実機への適用技術に関しては当社と中部電力㈱との共同研究によって開発したものである(図8)。

3.2 スラストスプリングの適用拡大

スラストスプリングは、スプリングのたわみによって軸受セクタ間の高さばらつきを吸収し、荷重分担調整作業を不要とするのものである。当社では、1981年以来、高速大容量機を中心に適用を行ってきたが、小荷重用のスプリングを開発し、シリーズ化することにより、中小容量機から

表2. PEEK-AとPEEK-Bの特徴

	PEEK-A	PEEK-B
成分	PEEK+CF(炭素繊維)+a	PEEK+a
機械強度	炭素繊維によって強化されており、優れた耐熱性・機械強度がある	ホワイトメタルとほぼ同程度
電気絶縁性	なし	あり
用途	高面圧・高速大容量機向け	中小容量機向け

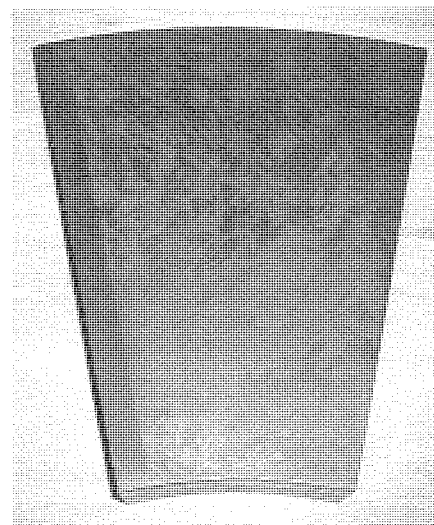


図8. 樹脂スラスト軸受

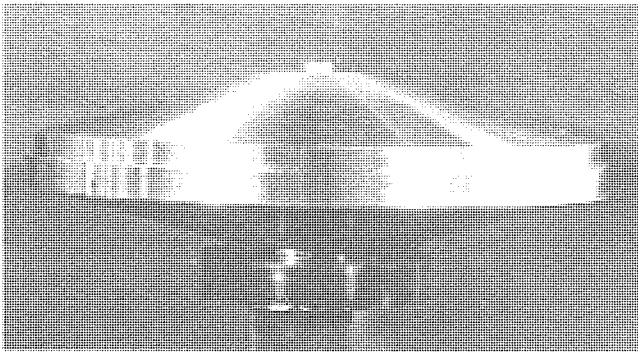


図9. スラストスプリング

高速大容量機までのプラントに適用範囲が広がった(図9)。

3.3 GAの適用

水車発電機は重量物であり、環境保護・省資源の観点から発電機構成部品の質量低減が要求されている。発電機の構成部品は、必要となる設計諸元を満足した上で、かつ、最も軽量となる構成を選定するのが理想的な設計である。近年、生物の進化の形態をモチーフにした最適化理論GAが着目されており、当社では、ISO14001への取組の一つとして、GAを用いた発電機構造物の最適設計を導入した。

水車発電機へのGAの適用例としてブラケットの事例を紹介する。ブラケットに要求される主な性能はスラスト荷重等が作用したときに機械的な強度を満足すること及び発電機の軸振動特性から要求される半径方向剛性を満足することであり、それらを満足した上で質量が最小となる構成を見出すことが最適設計となる。従来の設計手法に基いて下部ブラケット形状を選定した後、この構造をベースとし

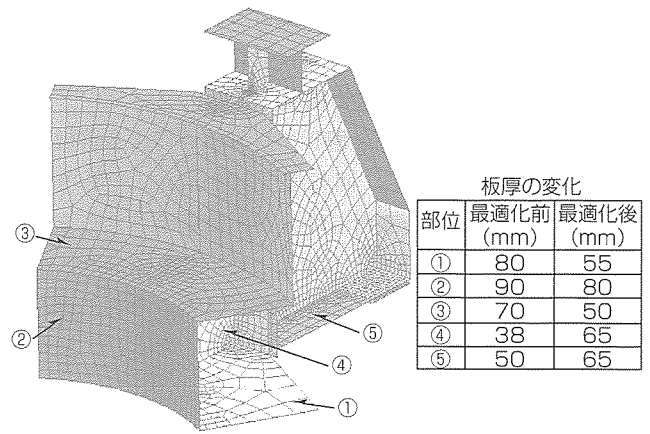


図10. GAによる板厚の最適化

て各部の板厚をパラメータにとり、GAによる最適化設計を実施した。GAの適用により、従来の設計手法で選定した下部ブラケットからすべての設計諸元を満足した上で約10%の質量が低減できる構造を選定し、実機構造として適用した(図10)。

4. むすび

三菱電機では、今後計画されている高速大容量発電電動機の開発を行い、設計・製造技術を確立した。また、中小容量機に関しては、樹脂軸受の適用やスラストスプリングのシリーズ化を完了した。これらの成果を基に、今後も信頼性の高い水車発電機／発電電動機を提供できるものと考えている。

水車／ポンプ水車の最新技術動向

要 旨

2000年6月、単段ポンプ水車としては世界最高落差、最大容量級の東京電力榑葛野川発電所の2号機が運開した。最近のポンプ水車は、発電電動機とともに電力系統、発電所の効率的運用及び経済性向上の観点から高落差・高速、大容量化の傾向を示すにとどまらず、運転範囲の拡大など性能向上においても発展が見られる。一方、従来の発電専用の水車においては、新規の計画が少ない中で老朽化した機械の新製・取替え工事が主流となっているが、これらにおいても発電所の経済性を追求した省力化のための補機の簡素化や性能向上が図られている。

(1) ポンプ水車の技術動向

1965年の後半からポンプ水車は高落差化・大容量化が急激に進んだが、それだけに、'75年代の後半には特に振動

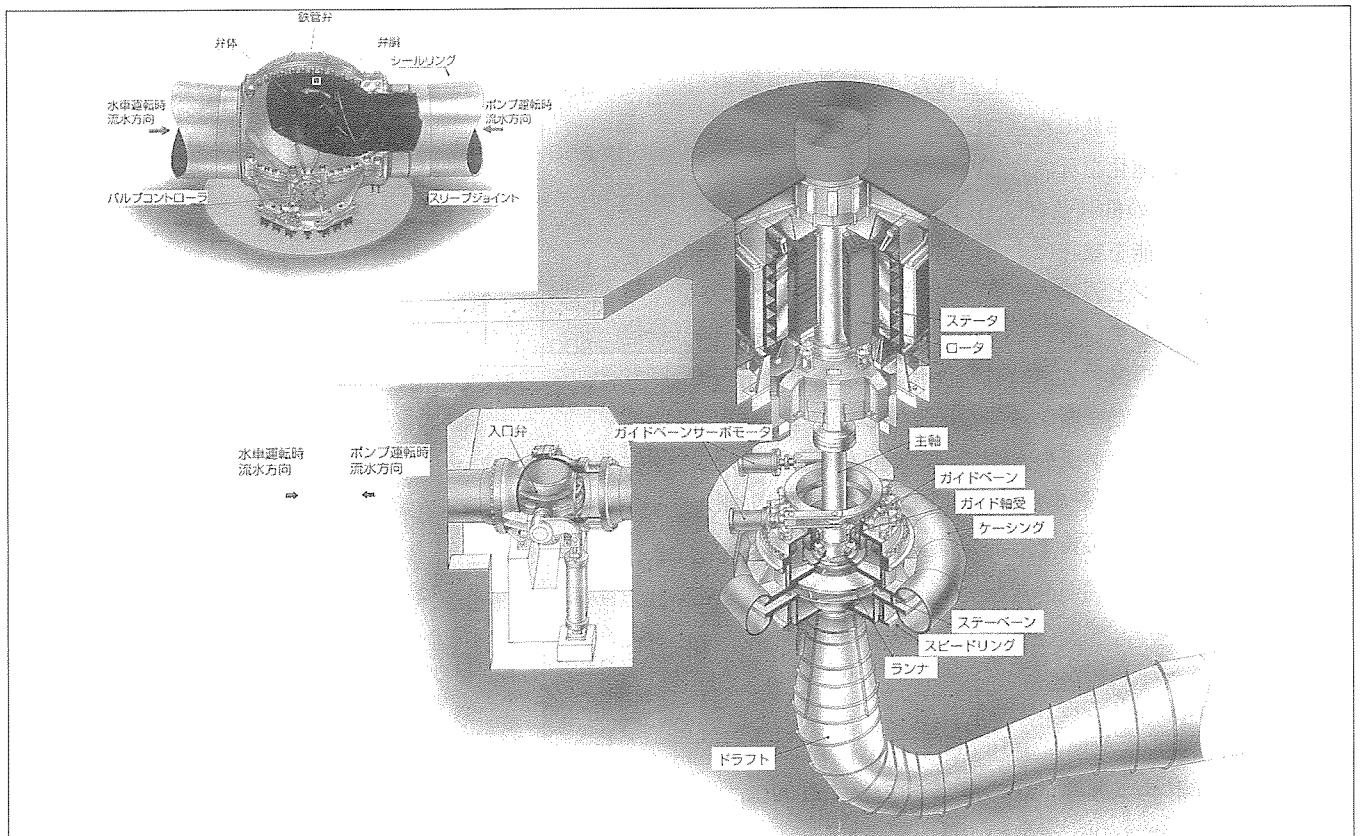
強度に関する問題も発生した。最近では、これらを克服し、更なる高落差・大容量化とより機能性を高めるための運転範囲の拡大等が指向されている。

(2) 水車／ポンプ水車の流体設計技術

従来、性能向上に関する具体的な開発と検討手法は模型試験による試行錯誤的なものが主体であったが、最近のコンピュータの発達に伴いCFD(Computational Fluid Dynamics)などの内部流動解析によって設計技術の機動性向上とそれを活用した性能向上に成果が出ている。

(3) ポンプ水車における構造設計技術

構造設計においてもFEM(有限要素法)による解析はより複雑な形状のものに対しても適用され、利便性の向上、高速化などによって高落差化・大容量化に寄与している。



三菱の高落差・大容量ポンプ水車

世界最高落差・最大容量級機である東京電力榑葛野川発電所納めポンプ水車2号機のイメージ図を示す。

ランナについては、水中固有振動数のチューンアップによる変動応力の低減、内部流動解析による下限運転可能範囲の拡大など新技術が適用された。

1. ま え が き

戦後間もない間まで言われていた水主火従の時代から比べると、最近では建設コストや環境保護など水力事業にとって厳しい社会環境下にあるが、そのような推移の中でも水力発電に関する技術は停滞することなく確実に進歩してきた。40年前に運開した我が国初のポンプ水車である大森川発電所の揚程が約130mであったことからすると、今回運開した葛野川発電所は最高揚程で779mと隔世の感がある。現在確認されている海外メーカーによるポンプ水車の最高揚程が700mであることを考えると、あらためて日本における揚水発電技術が世界を対象にしても高い水準にあることを認識させられる。

一方、普通水車においては、最近では老朽化した機器の新製取替え、新技術を適用した部分改修工事といったいわゆるリノベーション、アップグレード工事が主流となっている。これら水車に関する最新技術についてはこの特集号の“既設水力発電所への最新技術の適用”で述べることとし、本稿では、主としてポンプ水車の最近の技術動向について紹介する。

2. ポンプ水車の技術動向

2.1 高落差・高速、大容量化

ポンプ水車の最高揚程と水車運転時の最大出力の推移を図1に、また、ある揚程に対してどれだけ高速化されたかの指標となる高速化係数の推移を図2、図3にそれぞれ示す。このような高速化を可能にしたのは、ポンプ運転時のキャビテーションの抑制及びQ-H特性上で現れる逆流領域の改善が水車性能を犠牲にすることなくランナペーン形状及びガイドペーンとの翼列の最適化によって達成されたことが大きく寄与している。

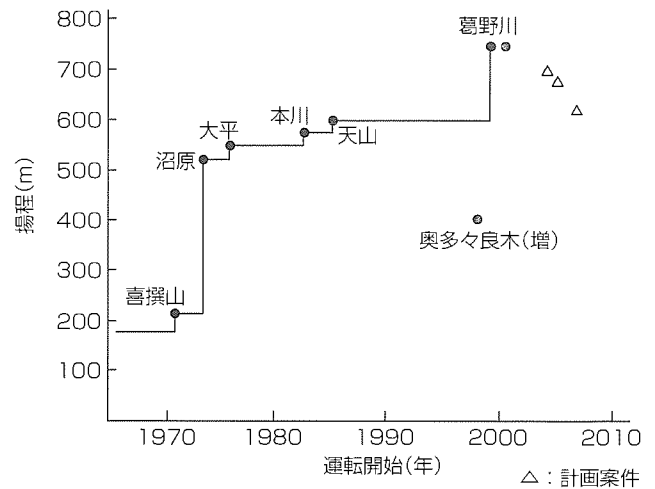
1975年代の後半、500m、300MW級ポンプ水車が出現したころ、ランナの振動に関する問題が発生した。この振動問題は加振周波数とランナの水中における固有振動数とが重要な要素となるが、その現象解明と改善には実機実測、大掛かりな模型試験が実施され、その成果がその後の超高落差の実現につながった。

一方、大容量化については、性能に対する検討、実績の積み重ねもさることながら、構造・強度の解析技術及び生産技術の進歩によるところも大きい。

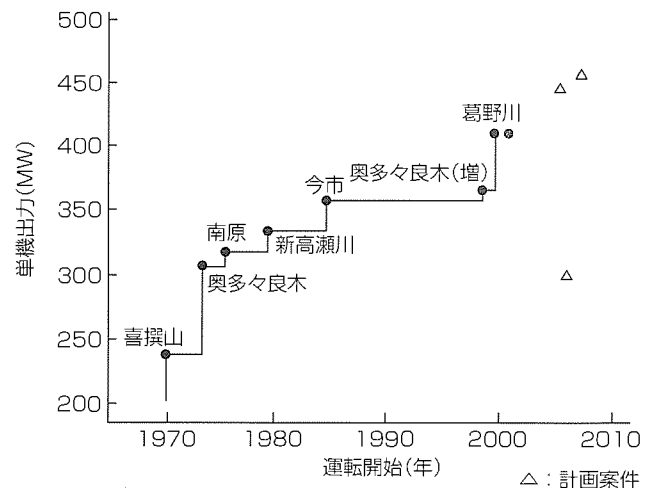
'98年4月に運開した関西電力(株)奥多々良木発電所向け増設機であるポンプ水車(最高落差407m、最大出力370MW、回転速度360min⁻¹)は、既設機に対し回転速度、最大出力とも約20%増加され当時国内最大容量機であったが、2分割構造のランナとしては世界最高落差、最大容量機である。この分割ランナに使用されているボルトは、最大260mmの大口径のものであるが、その安全性を確認す

るためFEMが活用され、適正なボルトサイズ、配置及びフランジ面圧を保持する初期締付け力が求められた。このようなFEMによる解析は、上カバー、スピードリングといったポンプ水車本体の主要構成部品のみならず入り口弁などの応力、変形解析にも活用されており、大容量化での設計技術に果たした役割は大きい。

2.2 運転範囲の拡大



(a) 揚程推移



(b) 容量推移

図1. ポンプ水車の最高揚程と最大出力の推移

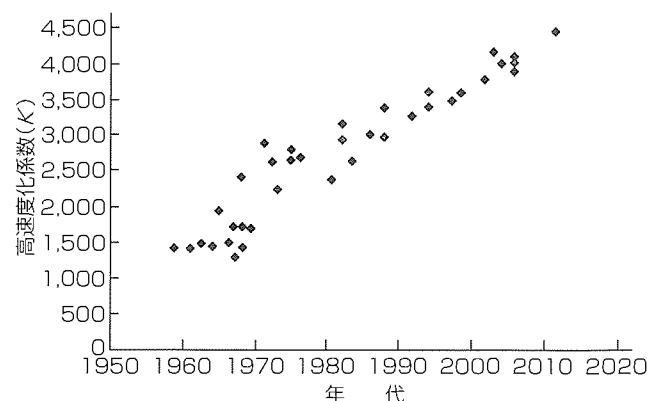


図2. ポンプ水車の高速化の推移

電力供給の形態が多様化する中で水力を維持していくためには、水力発電機器のみならず発電所全体を含めた建設単価低減への取組と水力の特長の一つである機動性を更に高める必要がある。なかでも機動性については、電力システムの安定化、質の向上のため最大入出力を得るまでの起動時間の短縮化のみならず、負荷変化幅の拡大が追求されている。水車方向のAFC運転においては、低負荷時ランナベーン入り口でキャビテーションが発生するため従来その下限値はおおむね最大出力に対して50%であったが、最近では30%程度の負荷まで運転可能な発電所もある。

3. 水車／ポンプ水車の流体設計技術

ここ10年近くの間でコンピュータは高速・大容量化そして小型化とともにアウトプットの可視化ソフト等が急速に進んだためCFDは水車／ポンプ水車の流体設計技術にも盛んに取り入れられるようになり、性能改善等には不可欠な手法となっている。最近では効率の予測もある程度の精度で求められるようになり、ケーシング入り口からステーベーン、ガイドベーン及びランナを含め吸出し管出口に至るまでを一体として解く一体解析も実用化されるようになってきた。

3.1 ポンプ水車における性能改善

国内におけるポンプ水車はキャビテーションが発生しない領域で運転されるため、キャビテーションの発生をいかに極小化するかが重点課題となる。変落差対応においては主としてポンプ運転時で周速が速いバンド側入り口キャビテーションが、また、運転範囲の拡大においては主として水車入り口キャビテーションが問題となる。CFDによる解析結果から、ベーン先端形状の曲率の改善を含めポンプ入り口部で発生するものに対してはその部分における相対速度と絶対速度が適正になるように入り口径を選定することにより、また、水車入り口部で発生するものに対してはベーンの入り口角とスキュー角を適正化することによって

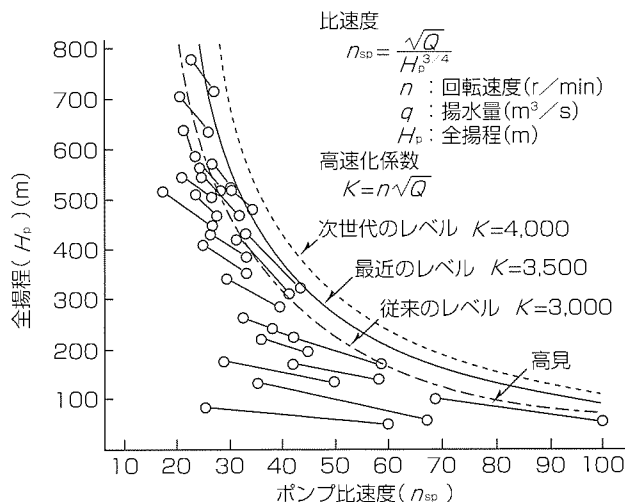


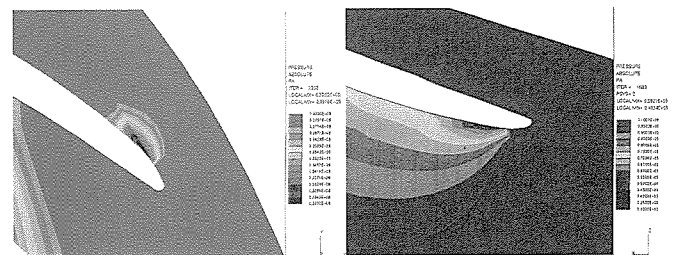
図3. ポンプ水車の全揚程及び比速度と高速化の関係

大幅な改善が達成された。ポンプ及び水車入り口部の解析結果の一例を図4に示す。

3.2 普通水車における性能改善

国内における実機での使用例はいまだ報告されていないが、長さの異なるランナベーンを交互に配列した比較的高落差に適したスプリッターベーン付きランナの開発が行われている⁽¹⁾。スプリッターベーンを設けることによって小流量及び大流量域でのランナベーン前縁からはく(剥)離が減少するとともにランナ出口における旋回損失が非設計点で少なくすることができるため、これらの流量域における効率が大幅に向上されている。スプリッターベーンの長さやピッチを変えた解析結果の一例を図5に、またそれをベースにして実施された模型試験結果を図6に示す。このような構造のランナはポンプ水車でも検討されている⁽²⁾。

4. ポンプ水車の構造設計技術



(a) 水車運転時 (b) ポンプ運転時

図4. ポンプ水車の初生キャビテーション解析例

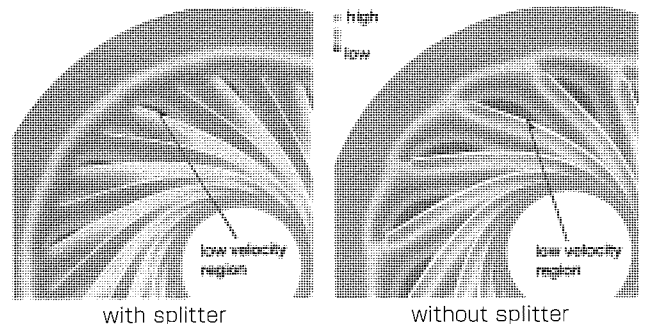


図5. 異間速度分布(Q/Q_{opt}=1.0)

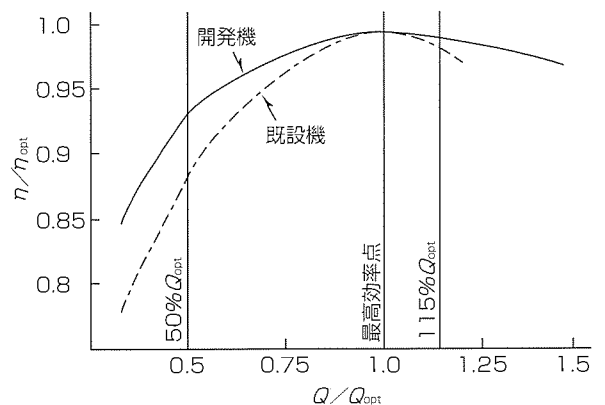


図6. 模型水車効率比較

前述のとおり、最近のポンプ水車における構造設計は三次元の有限要素法による解析が主流になっており、複雑な構造のものに対しても比較的容易に変形量、振動固有値、フランジ面圧解析などが広く実施されるようになり、構造設計における精度向上と効率化が図られている。

図7に前述のランナ水中振動固有値解析結果の事例を示す。水中におけるランナの固有振動数は振動モードの違いによってランナ周りの水の付加質量すなわちランナクラウンと上カバー下面とのすき(隙)間及び上カバーの剛性による影響を受けるため、これらを含めた一体解析が加振周波数からの固有値の離れ程度(離調率又は回避率)の調整には有効である。

図8には、2分割ランナにおける分割面圧の解析例を示す。ボルトの配置及び初期締付け力は左右対称であってもランナの構造は面対象でないため、荷重が作用した後の面圧分布は左右対称となっていない。このような解析により、非定常運転時を含め分割面の面圧が設計値内に納まり、分割ボルトの疲労強度に対しても安全となるボルトサイズ、初期締付け力及び配置の決定がされるようになった。

5. 今後の技術動向

電力供給の形態がいろいろな方面で多様化するなかで、地球のエネルギー資源を消費せず機動性のある電力を供給できる水力発電は再度見直されるべきである。そのためには、今まで以上に土木等を含めたトータル的なコストダウンと地球環境に影響を及ぼすことを少なくする配慮が必要である。今後とも、揚水発電については、外部環境への影響が少ない立地条件での高落差化・大容量化が指向されるだろう。また、これを可能とするためのCFDによる性能予測の精度向上などの取組が加速されると考えられる。海外ではコンピュータで形成された流水構造物の対象箇所を直接人間の手で変更し即座にその解析結果が確認できるといったバーチャルリアリティを使用した解析手法も紹介されており³⁾、ますますこの分野における進展は目を離せないと考えられる。

6. む す び

自然環境への影響、建設コスト面等から水力発電に対する見方には厳しいものがあるが、再生可能エネルギーの有効活用、機動性のある電力供給システムといった点からは今後ともエネルギーの将来を担う一機種としての立場には変わりはない。国内、海外の動きを含めて三菱の技術的な取組を中心にその一端を紹介したが、東京電力(株)葛野川発電所で見られるように我が国における揚水発電技術は世界をリードするものであり、我々も今後ともこの技術力を

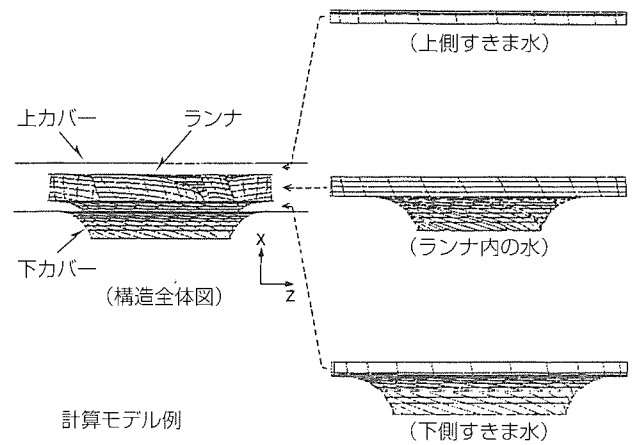


図7. ランナ水中固有振動数一体解析

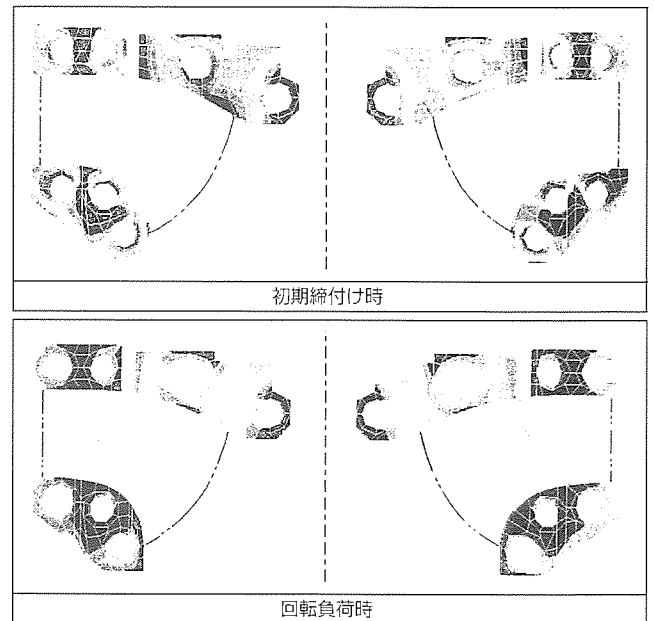


図8. 2分割ランナフランジ面圧解析例

継続し発展させる所存である。

参考文献

- (1) 宮川和芳, 松下 広: フランシス水車の性能に及ぼすランナスプリッターブレードの効果, ターボ機械, 27, No. 6, 57~64 (1999-6)
- (2) 池田孝蔵, 渡部繁則, 宮川和芳, 松下 広: スプリッターブレード付高落差ポンプ水車の開発, 平成11年電気学会電力・エネルギー部門大会, 668~669 (1999-8)
- (3) Ruprecht, A., Eisinger, R., Gode, E., Rainer, D.: Virtual Numerical Test Bed for Intuitive Design of Hydro Turbine Components, Hydro Power into the Next Century, 265~272 (1999-10)

水力発電所における監視制御システムの動向

石黒達也*
町野利太*

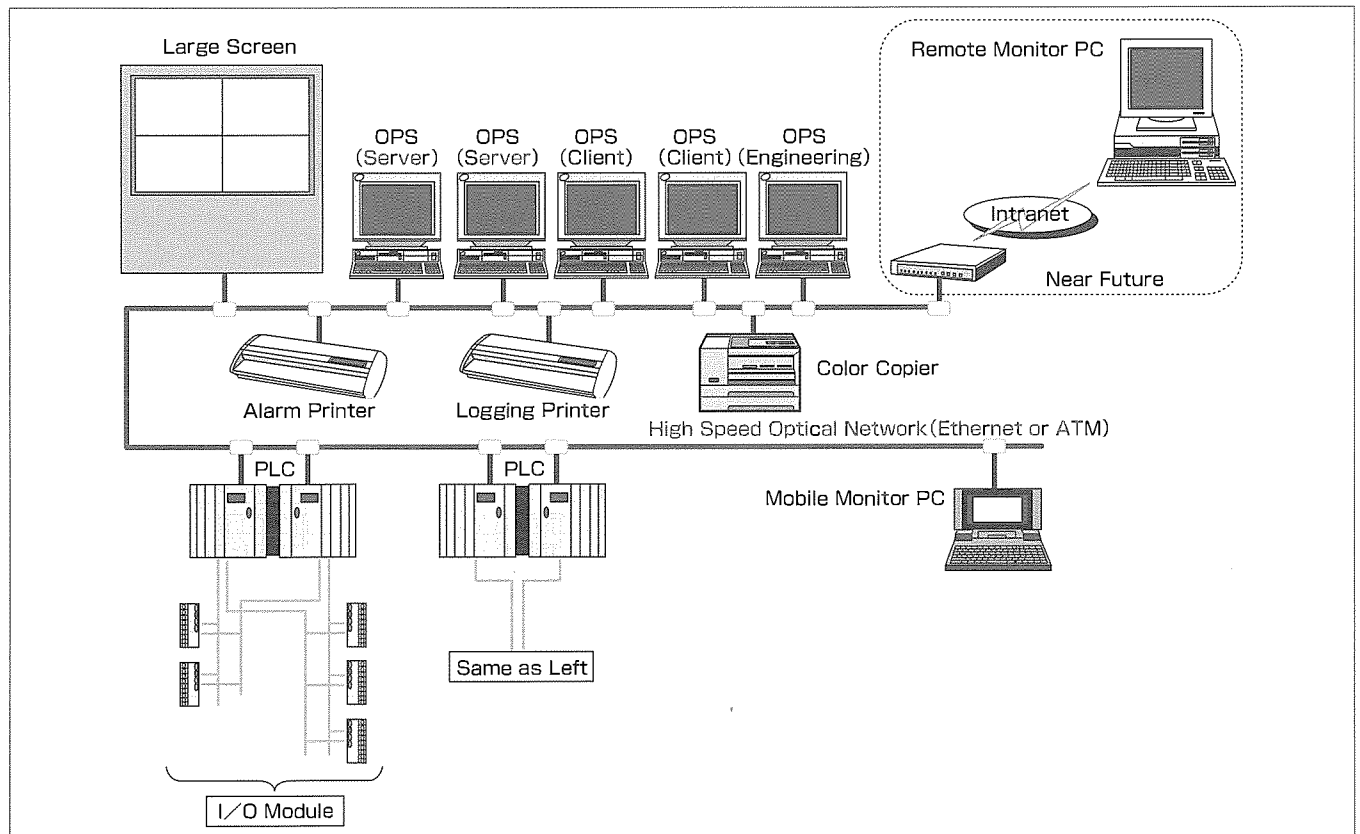
要 旨

系統周波数の調整やピーク電力対応など電力系統で重要な役割を担っている大容量揚水発電所では、専用OS、専用装置を持つ工業用計算機(ICS)を適用した総合監視制御システム(以下“SCADA”(Supervisory Control And Data Acquisition)という。)を設置していた。このSCADAシステムでは、主機の運転(一部機能のみ)・状態監視を始め各補機の状態監視や異常診断等を行い、プラントの早期故障診断を行うことができる。また、ヒューマンインタフェース(HMI)の適用により、操作員の運転作業を簡略化することができる。

しかしながら、近年、パソコン(PC)に搭載されるCPU

の処理速度の高速化、メモリの大容量化により、パソコンの機能・性能は飛躍的に向上しており、数年前の工業用計算機の性能をりょうが(凌駕)している。また海外水力発電所では、客先スペックで、パソコンをベースとしたオペレータステーション(OPS)を要求されており、またOPSからプラントのすべての起動/停止、監視を行うことを要求されている。

本稿では、最近の客先ニーズや最新動向を踏まえたプラント監視制御システムと、海外水力プラント向けSCADAシステムについて述べる。



海外水力発電所SCADAシステム

海外水力発電所を中心に適用を考えている総合監視制御システム(SCADA)の構成を示す。

1. ま え が き

近年、パソコンに搭載されるCPUの処理速度の高速化、メモリの大容量化によってパソコンの機能・性能は飛躍的に向上しており、従来工業用計算機(ICS)を適用していた総合監視制御システムの領域にもパソコンをベースとしたシステムの構築が求められている。また海外水力発電所では、客先スペックで、パソコンをベースとしたオペレーターステーションを要求されており、またOPSからプラントのすべての起動/停止、監視を行うことを要求されている。

本稿では、これまでの監視制御システムから、現在の客先ニーズ、今後海外水力発電所を中心に適用を考えているSCADAシステムについて述べる。

2. 従来の監視制御システム

図1に従来の監視制御システムの構成例を示す。

このシステムでは、各号機にシーケンサを設置し、光ネットワークで構成している。OPSには工業用計算機を適用し、周辺機器としてはフルグラフィックCRT、ハードコピーやレーザプリンタがある。

専用のハードウェアとソフトウェアを使っているため、高価であり、かつ大型の装置となっている。

3. 海外プラント向けSCADAシステム

この章では、海外プラント向けSCADAシステムのシステム構成について述べる。図2にシステム構成を示す。

このSCADAシステムでは、CRTオペレーションが全面

的に採用されており、一部を除きほとんどの機器をOPSの操作フレーム画面から操作することができる。EWSは、Control Building, Administration Building, 発電所から約200km離れたRemote Control Centerからの計3か所に設置されており、それぞれからプラント起動/停止を始め各機器の操作をすることができる。EWSは機能分担されており、Operator Workstation, Engineering Workstation, SOE/HSR/LOG Workstation, Maintenance Workstationがある。

それぞれの機能について以下に示す。

(1) Operator Workstation

通常プラント操作をするもので、Control Buildingに設置されているDual CRT Operator Workstationは、1台のEWSで2台のCRTを操作することが可能である。

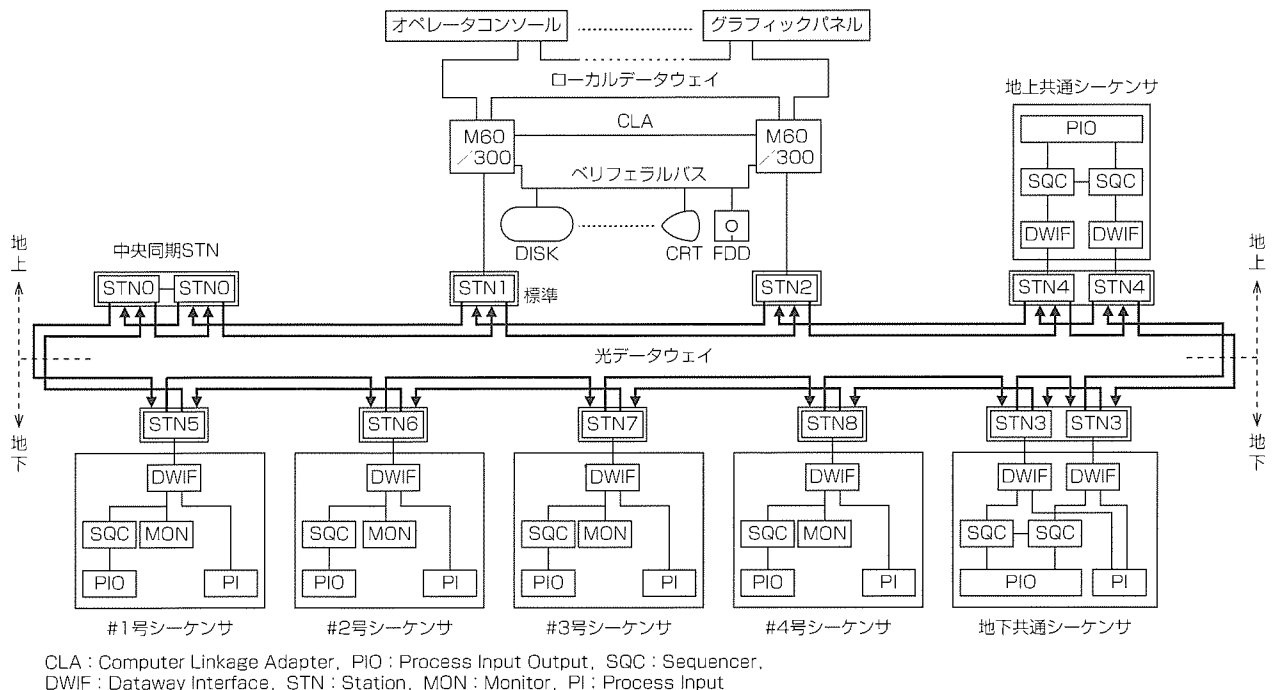
(2) Engineering Workstation

系統図や操作フレーム等のOPS画面及びアプリケーションソフトの製作を行う。シーケンサのプログラムはPOL (Problem Oriented Language)が採用されているが、POLの作成・修正も、専用の保守ツールからではなく、このEngineering Workstationで作成・修正・一元管理し、シーケンサにダウンロードしている。

(3) SOE/HSR/LOG Workstation

ヒストリカルトレンド等の長時間データ蓄積や日誌処理を行っている。各OPSでヒストリカルトレンド等を表示する場合は、このWorkstationで蓄積されたデータを転送し表示する。

(4) Maintenance Workstation



CLA : Computer Linkage Adapter, PIO : Process Input Output, SQC : Sequencer, DWIF : Dataway Interface, STN : Station, MON : Monitor, PI : Process Input

図1. 従来の監視制御システム

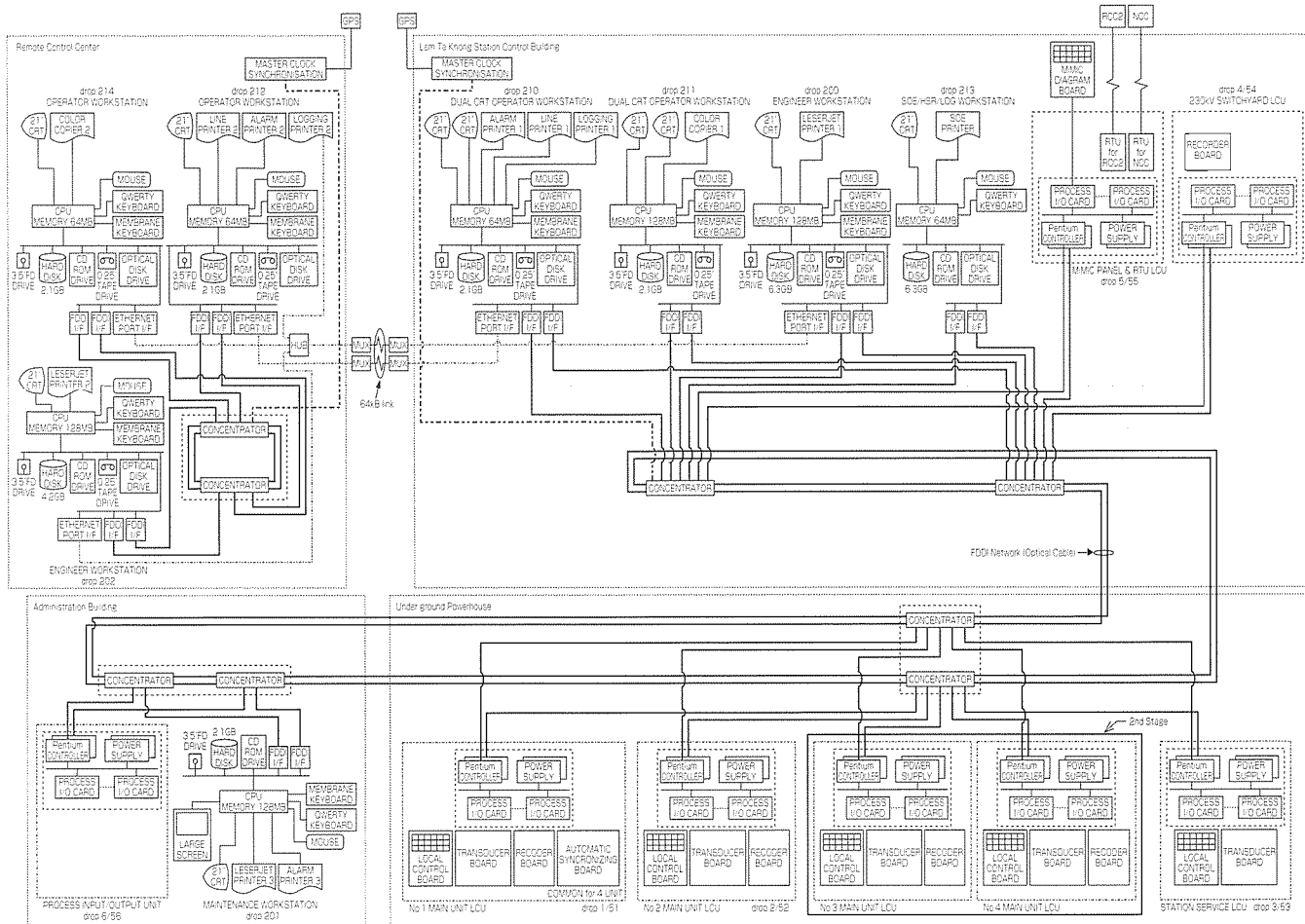


図2. 海外プラント向けSCADAシステム構成

Large Screenを操作するためのものである。

OPSには、プラント起動／停止、操作フレーム、トレンドグラフ表示、シーケンスモニタ、系統図、SCADAシステム状態監視、警報表示、日報／月報等の各機能がある。また、試験用として、各プロセス点番号の入力走査除外やデータ設定等を行える。

OPSの画面例を図3に示す。画面表示スピードは約1秒となっており、違和感なく操作できる。

LCU(Local Control Unit：シーケンサ)は、発電機用、所内用、230kV GIS用、Mimic Panel・RTU用が設置されている。LCUは、信頼性向上のためCPU及び電源部を二重化しており、片系(制御系)異常時には自動的に他系に切り換わる。LCUには、それぞれプロセス入力カードとして、アナログ入力カード、アナログ出力カード、デジタル入力カード、デジタル出力カードのほかに、1msで入力可能なSOE(Sequence Of Event)カードを搭載している。POL実行周期は任意に設定可能であり、今回は100msとした。

Control Building～発電所間は、約1km離れている場合、信頼性確保の観点から、プラントネットワークは、100MbpsのFDDIネットワークとした。プラントネットワ

ークとOPS、LCU間は直接接続せず、Concentratorを通して接続することになる。

Concentrator～OPS・LCU間は、CDDIも可能であったが、これもノイズ等の影響を考慮して光ケーブルとした。

以上のようなシステムを構築し、2000年2月から総合組合せ試験を実施し、画面の表示スピード、レイアウトに対し所期の成果が得られた。

4. 客先ニーズと最新SCADAシステム

近年ほとんどの海外水力発電所ではSCADAシステムが適用されており、この章では近年の客先ニーズ(海外)と当社のSCADAシステムについて述べる。

客先から要求されたSCADAシステムのハードウェアスペックは、Windows NT^(注1)やUNIX^(注2)等の汎用OS、Pentium III^(注3)の適用を始め、メモリサイズについても細かい要求があった。機能面では、予測監視や異常監視等の高度監視システムの要求はないが、従来の盤に加え、OPSからすべてのプラント操作をするよう要求されている。

(注1) “Windows NT”は、米国Microsoft Corp.の登録商標である。

(注2) “UNIX”は、X/Open Co.Ltd.の登録商標である。

(注3) “Pentium”は、Intel Corp.の登録商標である。

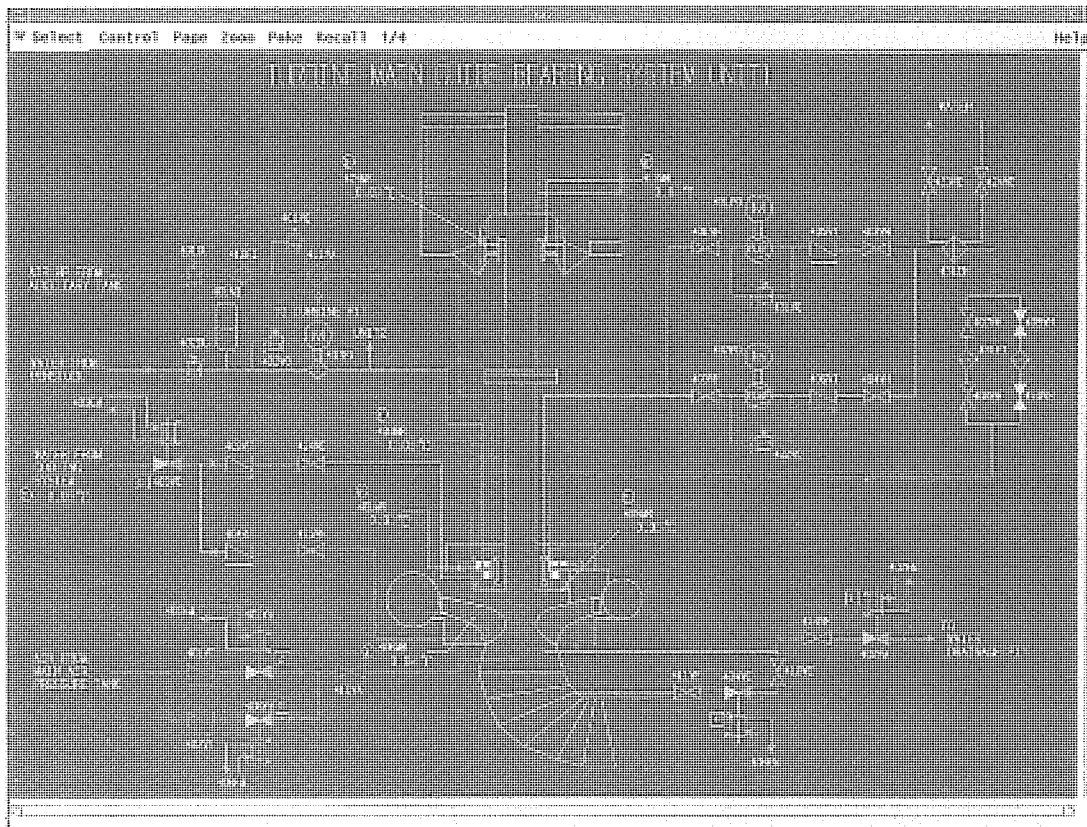


図 3. OPSの画面例

OPSについては、完全にパソコンをイメージしており、従来のような工業用計算機の適用はあり得ない状況となっている。

このスペックに対しての当社提案のSCADAシステム構成を図4に示す。

このSCADAシステムに適用するOPSは、以下の特長を持っている。

- PC/ATアーキテクチャ採用 (CPU: Pentium III 600MHz, コスト削減・小型化・低電力化を実現)
- OSにWindows NTを採用し、ソフトウェアの製作に関しても、パソコン上のWindows環境で汎用アプリケーションとの連携も考慮
- 充実したRAS機能を持ち、早期な異常検出と原因究明/解決をサポート
- マルチウィンドウ表示、複数画面統合表示など、優れた画面表示、展開、操作性を実現

製品イメージを図5に示す。

また、シーケンサは以下の特長を持っている。

- OPSと同様、PC/ATアーキテクチャ採用 (低コスト・高性能化を実現)
- 高機能なアルゴリズムを用意し、高級な演算制御が可能
- 同一コントローラで高速演算処理、シーケンス制御等を用途別に最適な処理時間で設定・実行すること

が可能 (プログラム実行周期は5msから設定可能)

- POLを始めSCOL (Sequential Control Oriented Language), DDC (Direct Digital Control) など様々なコントローラ用マルチ言語を具備
- 二重化構成が可能

ネットワークに対する客先要求はFDDIであるが、TCP/IP, UDP/IPのEthernet^(注4)が現在の主流ネットワークであることから、FDDIと同等の100Mbpsの高速通信速度を持つバス形Fast Ethernet (FEnet) を適用した。

海外メーカーのSCADAシステムの仕様を入手したが、OPSはパソコンベースとしている。今回適用を考えているオープンHMI/シーケンサとほとんど同一スペックとなっており、海外メーカーとも十分競争できるレベルになってきた。コスト的にもほぼ同じであるが、更に標準化・汎用品適用を進め、コストダウンを図る所存である。別の案件では、ISDN等の回線を利用したリモートメンテナンス機能も要求されている。

以上のことから、海外水力発電所を中心に今後のSCADAシステムに必要な仕様は以下のとおりと推測される。

- 従来盤に代わり、OPSからの機器操作 (CRTオペレーション) の全面適用
- OPSは、パソコン (サーバ) タイプの適用による省コ

(注4) "Ethernet"は、米国Xerox Corp.の登録商標である。

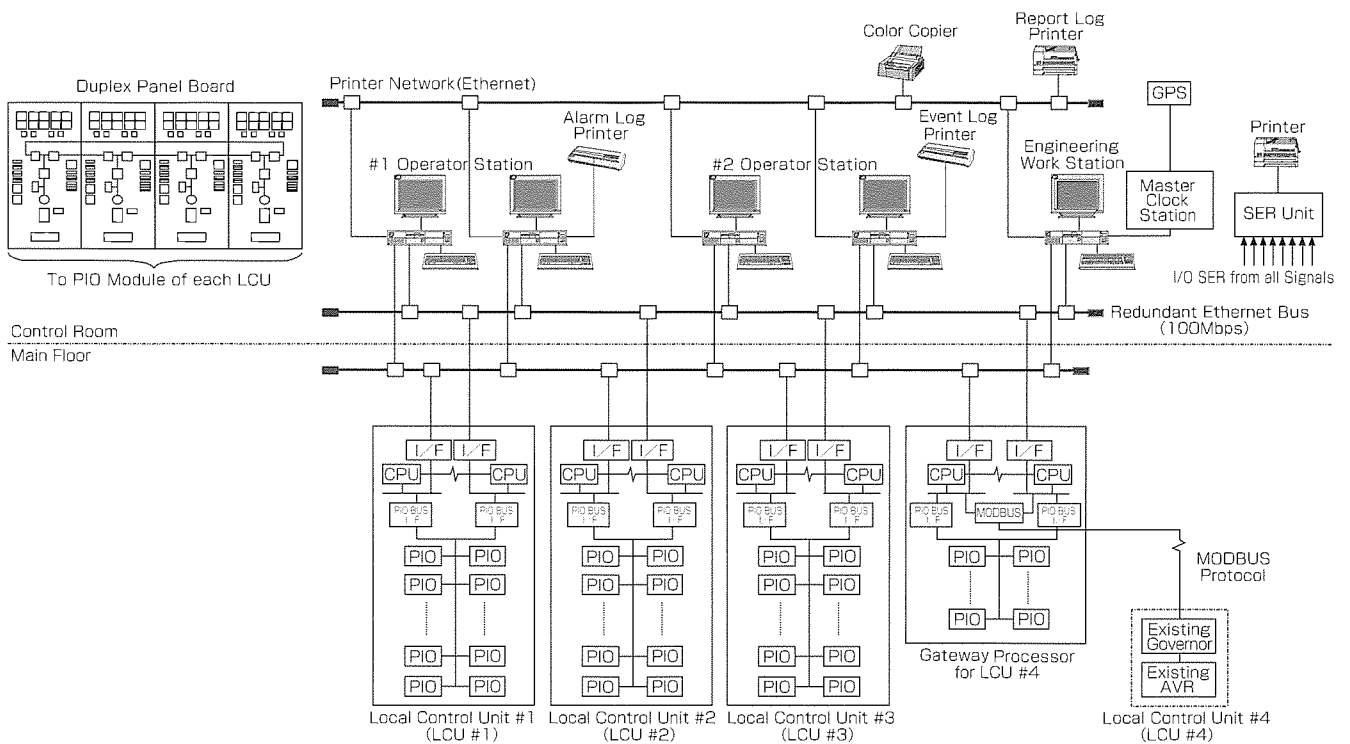


図4. 海外水力SCADAシステム(当社システム)

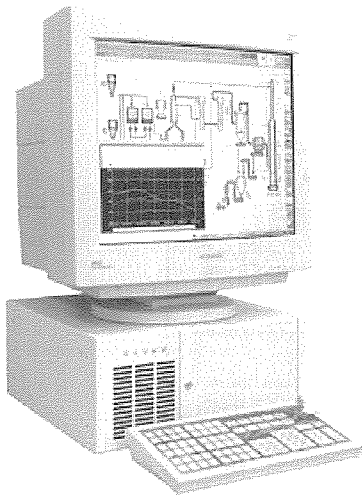


図5. オープンHMI

スト・小型化

- 100Mbpsを超える高速ネットワーク
- リモートメンテナンス機能

5. むすび

最近の海外水力発電所SCADAシステムを中心に、監視制御システムの動向について述べた。

デジタル機器の技術は飛躍的に進んでおり、一般家庭にもパソコン等IT機器がほぼ浸透してきたことから、OPSに対する客先ニーズも従来の工業用計算機やEWSから小型・汎用品であるパソコンにシフトしてきている。また、監視制御システムを水力発電所に適用する要求は海外が非常に多く、またOPS仕様に対する要求も海外が厳しいが、今後、国内でも同様に進んでいくと考える。

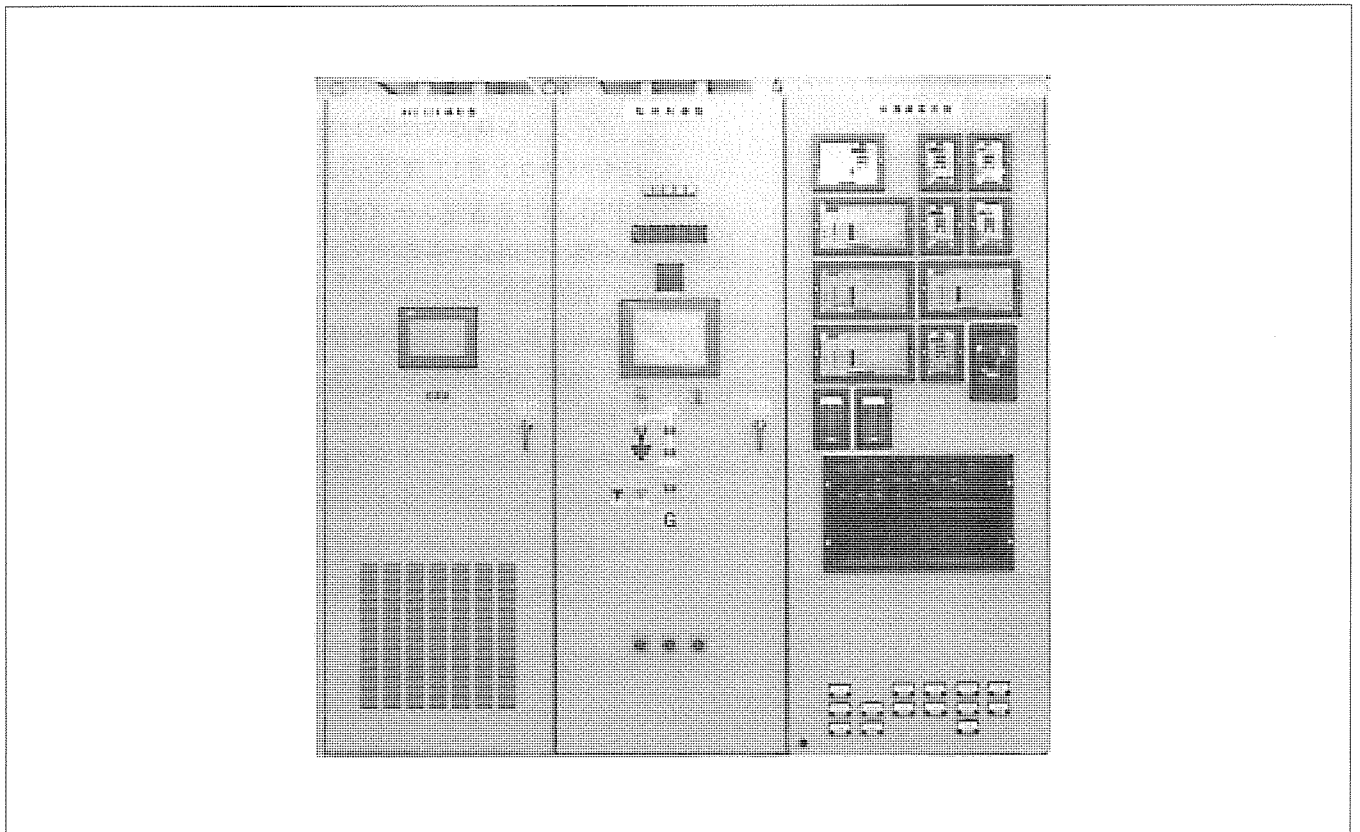
様々な客先ニーズがあるが、ニーズにマッチした製品とシステムをタイミングよく提案し、受注に結び付けていく必要がある。また、コスト削減のため汎用品を有効活用しなければならないが、当社としては、品質と信頼性のあるシステムを提供していく所存である。

中小水力発電所向け一体形配電盤技術

要 旨

中小水力発電所向け制御装置は、据付けスペースの縮小や価格の低減等のニーズが強く、各メーカーにおいても、シーケンス制御、調速制御、及び励磁制御を一体とした一体形配電盤を開発し、各電力会社、公営ユーザーに納入を実施している。三菱電機においても、古くは1980年代後半から一体形配電盤についての研究開発に取り組んできたが、時代の変遷につれて、要素技術の進歩、それをベースとした使用部品の変化、性能向上及び顧客ニーズの拡大に従い、製品形態についてもそれに合わせて開発し改良を繰り返してきた。

当社においては、'99年度に最新機種の一一体形配電盤を7発電所、8ユニットに納入し、順次現地据付け調整試験を完了しているが、本稿では、これらを紹介するとともに、今後の機能拡張に対応するためのテレコン機能、保護機能の開発内容について紹介する。また、一体形配電盤の機能拡張メニューとして、NTT回線を使用して発電所の状態監視、故障監視、運転管理等が電力所等から容易に実現できる発電所保守支援システムについても製品化を実現しており、これについても紹介する。



一体形配電盤

1999年度に7発電所、8ユニットに納入を実施した一体形配電盤の標準的な構成を示す。向かって左からAVR・GOV補助盤、監視制御盤、保護継電器盤の構成となっている。シーケンス制御機能、調速制御及び励磁制御機能について左2面で実現している。保護機能についてユニット型デジタルリレーを採用した例である。

1. ま え が き

中小水力発電所は、据付けスペースの削減、建築価格の低減のニーズが強く、従来からのシーケンサ、ガバナ、AVR等の制御装置を発電所内に分散配置してシステムを構築することはほとんどなく、監視制御機能を簡略・縮小化し、装置自体をコンパクトに設計する必要がある。三菱電機においても、上記客先ニーズを反映し、シーケンサ、ガバナ、AVRの機能を1コントローラで実現できる高速・大容量コントローラを1996年に開発し、'99年度に一体形配電盤の製品化を実現した。

本稿では、その開発と製品化に当たったの内容を紹介し、また、今後のニーズとして、テレコン機能、保護機能の一体形配電盤への取組に対する開発内容について紹介する。また、保守・点検作業を軽減する意味で、発電所の運転記録、状態記録、計測データ等をNTT回線を使用して電力所等から容易に監視・管理できる発電所保守支援システムについても紹介する。

2. 一体形配電盤の製品化

一体形配電盤開発ニーズとして中小水力発電所における建設コスト低減と省スペースがあるが、これらに対する開発課題として、①1コントローラでのシーケンス制御、調速制御、励磁制御の実現、②励磁制御パワー部の省スペース化を実施しており、これについて以下のとおり説明する。

2.1 1コントローラ化の実現

当社の一体形配電盤に使用しているコントローラは、シーケンサ、デジタルガバナ、デジタルAVR等にも使用している高速・大容量コントローラで、メモリ容量的には上記三つの制御機能を実装するに十分である。ここで、ガバナについては電気協同研究第42巻第2号で定義のY級相当のレスポンスを、AVRについては過渡応答性能を確保するために演算周期を短時間とするため、CPUの処理についてガバナ及びAVRの処理を独立させ、シーケンス制御ロジックとは別個に実施することとした。ロジックを独立するに際して、ガバナ、AVRのロジックを固定化するためにロジックの標準化を実施し、変更すべき部分(パラメータ等)についてはシーケンス制御ロジック部にそれぞれ設定領域を設け、その値を初期起動時に読み込むこととした。また、ガバナ及びAVRに使用する入出力を専用入出力とシーケンス制御にも使用する兼用入出力とに分けて、専用入出力を上記サンプリング周期で処理することとした。これにより、ガバナでのY級性能の実現、AVRにおける過渡安定性を確保することができた。

2.2 パワーユニット省スペース化

一体形配電盤の適応範囲として発電機の界磁電圧、界磁電流の上限値を中小水力向けに限定し、その上で、サイリ

スタ素子の選定を実施したが、以下の点を留意し、標準化設計を実施した。

- (1) 素子の選定に当たっては、スタックタイプを適用し、製作段階での作業性を向上した。また、ユニットの高さを低くするために、モジュールスタックを採用した。
- (2) パワーユニットの冷却方式については自冷方式を検討したが、ユニットの寸法を極力小さくするため、強制冷却とした。またファンについては、保守点検周期を最大限とする上で20年メンテナンスフリーの長寿命ファンを採用した。

上記内容を実施したことで、パワーユニットの体積を当社従来品の約60%とすることができた。

上記以外にも、タッチパネルの採用、PIO処理高速化のための高速パラレルバスの採用等を実施し、シーケンス制御、調速制御、AVR制御の3機能を具備した一体形配電盤を配電盤2面構成で製品化した。図1に一体型配電盤のラックアップ図を示す。

3. テレコン機能、保護機能の開発

テレコン機能と保護機能については以下のとおり開発製品化を実施中であり、2001年度から市場投入の目途がついたので、それについて紹介する。

3.1 テレコン機能

テレコン機能については、現状の一体形コントローラとは別ユニットで機能を構成することとした。これは、テレコン子局機能を単独で追設するニーズと、テレコン通信機能単独での更新(サイクリック通信方式からHDLC通信方式への移行等)等を配慮したものである。

テレコンシステムとしては、機能単位でのパッケージ化を意識し、通信方式によって基板を入れ替えることで対応することとしている。テレコン自体の伝送容量については、適用発電所の規模から、制御(30点)、計測(40点)、表示

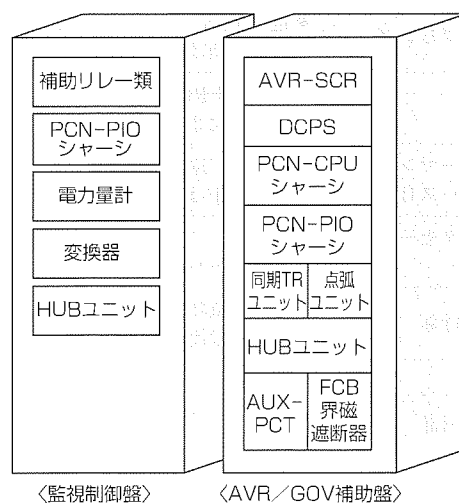


図1. 一体形配電盤ラックアップ図(扉開状態)

(200点)、数値制御(5点)とした。また、一体形CPUとのインタフェースについてはイーサネットを採用した。保守ツールについては、単独設置も考慮して専用保守ツールで検討しているが、一体形CPUとの兼用もできるように保守ツール立ち上げ時のメニュー選択を検討している。また、万一一体形CPUが故障した場合の遠方への情報連絡手段として、直結プロセス入力を装備することとしている。

3.2 保護機能

保護機能については、制御と保護分離思想が主であり、それに対応できるよう、テレコン機能と同様に、別ユニットで独立できる構成とした。保護装置のシステムの構成を図2に示す。

保護リレーには当社新型保護リレー“MELPRO-CHARGE”をシングルシステムとして採用する。

MELPRO-CHARGEの仕様は表1に示すとおりである。一体形CPUとの接続は、イーサネットでの通信インタフェースを基本としている。保守ツールについては、CPUに直接パソコンを接続することで、パソコンにインストー

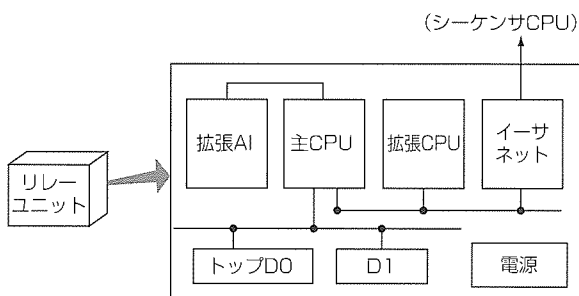


図2. 保護装置システムの構成

表1. MELPRO-CHARGEの仕様

項目	デジタルリレー-MELPRO
AD精度	● 14ビット有効精度 (16ビットAD変換)
サンプリング	● 電気角7.5° ● 演算周期は30°
CPU	● 32ビットRISC (従来比2~5倍)
ヒューマンインタフェース(HI)	● 可搬形/遠隔HI(パソコン使用) ● 通信I/FはTCP/IP
データセーブ	● あり ● 解析ツールはオプション
故障診断	● 不良部位特定機能 (表示は簡素化)
ソフトウェア記述言語	● リレー } 高位記述言語 ● シーケンス } ● HI }
マルチCPUアーキテクチャ	● 基本的にシングルCPU構成 (ユニット形デジタル指向)
通信I/F	RS-232C, TCP/IP

ルされている汎用ブラウザを経由して常時監視機能等の故障情報、整定値変更等が可能となる。また、オプションとしてWebカードを追加することで、遠方からの装置の状態監視が可能となる。

保護機能については、上記以外にコストメリットに主眼を置いた対応として、ユニット型デジタルリレーのMELPRO-DASHシリーズ(図3)の適用も可能であり、ユーザーの要求に対応したラインアップが可能である。

4. 発電所保守支援システム

発電所保守支援システムは、今後の保守点検業務の簡素化・省力化を目的とし、発電所の状態信号や計測データを電力所等から随時監視・管理できるものである。この装置は、シーケンサの保有する各種発電所のデータ(状態信号、計測信号、故障信号等)を発電所にWebサーバを設置することでそのデータを収集し、HTML(Hyper Text Markup Language)化することにより、NTT回線経由で電力所等のパソコンから汎用のブラウザを使用して発電所の運転状態を把握するものである。保守支援システムのシステムの構成を図4に示す。

このシステムの特長としては次が挙げられる。

- (1) Webサーバはイーサネット通信、シリアル通信等をサポートしており、異メーカーの装置からでも容易にデータを収集することが可能である。
- (2) 運転情報はHTML化されているため、端末用には専用のパソコン等は必要なく、汎用ブラウザがインストールされているパソコンであればどこからでも運転状態の把握が可能である。また、ハードウェア及びソフトウェアを付加することによって端末の同時接続も可能となる。
- (3) 基本的には既存システムにWebサーバ、UPSを付加するのみであり、現地工事については1~2週間程度で容易に可能である。

図5に、Webサーバで作成した画面例を示す。

表示できる運転情報としては次のものがあるが、これ以

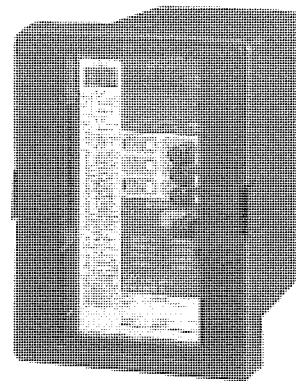


図3. MELPRO-DASHの外観

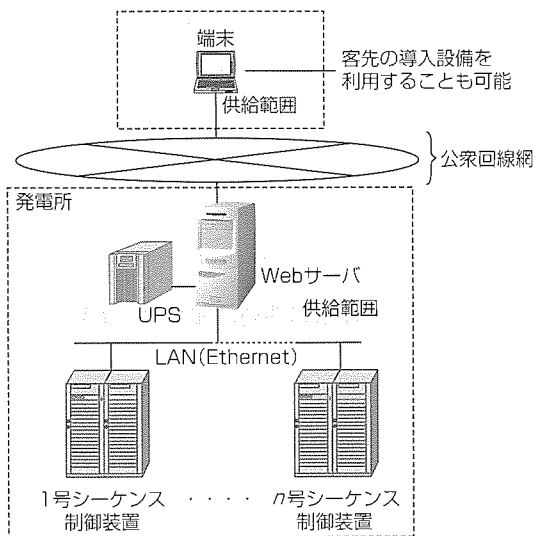


図4. 保守支援システムの構成

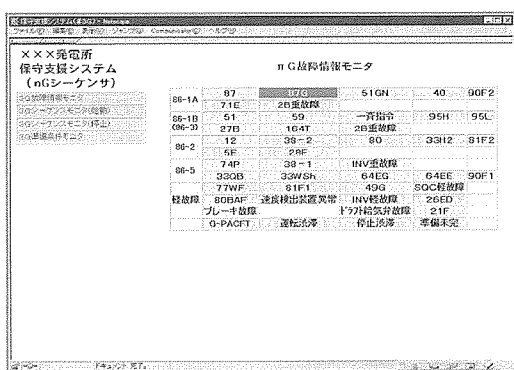


図5. Webサーバでの画面例

外に、補機運転監視、主機状態監視、帳票管理についても随時機能拡張等で対応できることとしている。

- 故障情報モニタ(随時更新)
- 起動/停止シーケンスモニタ
- 準備条件モニタ

5. 今後の展開

今後の課題としては、より容量の小さい発電所へより安価なシステムを提案する必要がある。当社においても、現

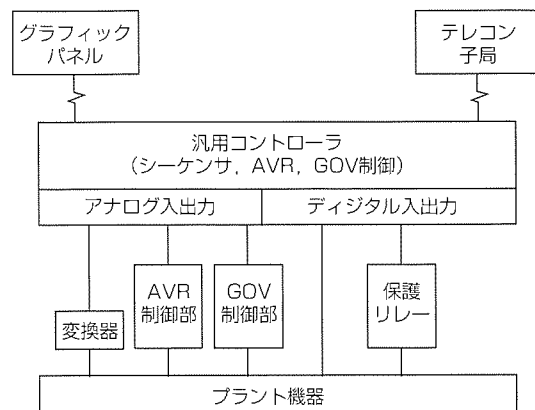


図6. 廉価型一体形配電盤のシステム構成例

在、汎用コントローラを採用した一体形配電盤(廉価型一体形配電盤)の開発と研究を進めており、2000年度を目途に製品化を計画している。廉価型一体形配電盤は、主として小水力プラントをターゲットとして開発している。汎用シーケンサは、電力向け専用コントローラ等に付随している高速特殊PIOカードを持っていないため、特に過渡応答性に劣る。また、一般仕様といった面でも、特に耐電圧仕様等では電力向けに比べて低い仕様となっている。反面、コスト的には電力仕様に比べてハードウェアコストを削減できるメリットがある。廉価型一体形配電盤については、制御部分のみならず、保護機能についても前述のユニット型保護リレーの採用を検討しており、現在、保護要素の標準化とリレー仕様の標準化についても検討を進めている。図6に廉価型一体形配電盤のシステム構成例を示す。

6. むすび

電力仕様の一体形配電盤、追加機能であるテレコン、保護機能、保守支援システム及び現在開発途中である廉価型一体形配電盤について紹介した。いずれも中小水力向けに対応した低コスト、省スペース、保守簡素化を目的としたものであり、現状の市場ニーズを反映したものである。当社の取組としても、特に保守の簡素化を主体に、現状の最新技術の採用を視野に入れた開発・検討を進めていく所存である。

発電機励磁制御における技術動向

森田和宏*
田中誠一*

要 旨

発電機励磁制御装置は、発電機端子電圧の一定制御、各種励磁制限機能、及びシステムの安定化機能などを具備しなければならない。これらに加えて、水力発電所向け特に揚水発電所では、頻繁かつ高速に起動停止を繰り返す運用に対応した起動停止時の励磁制御、電気制動時の励磁制御等の制御が要求される。以下に、これらを実現した最新の励磁制御装置について概要を紹介する。

(1) 揚水発電所起動方式

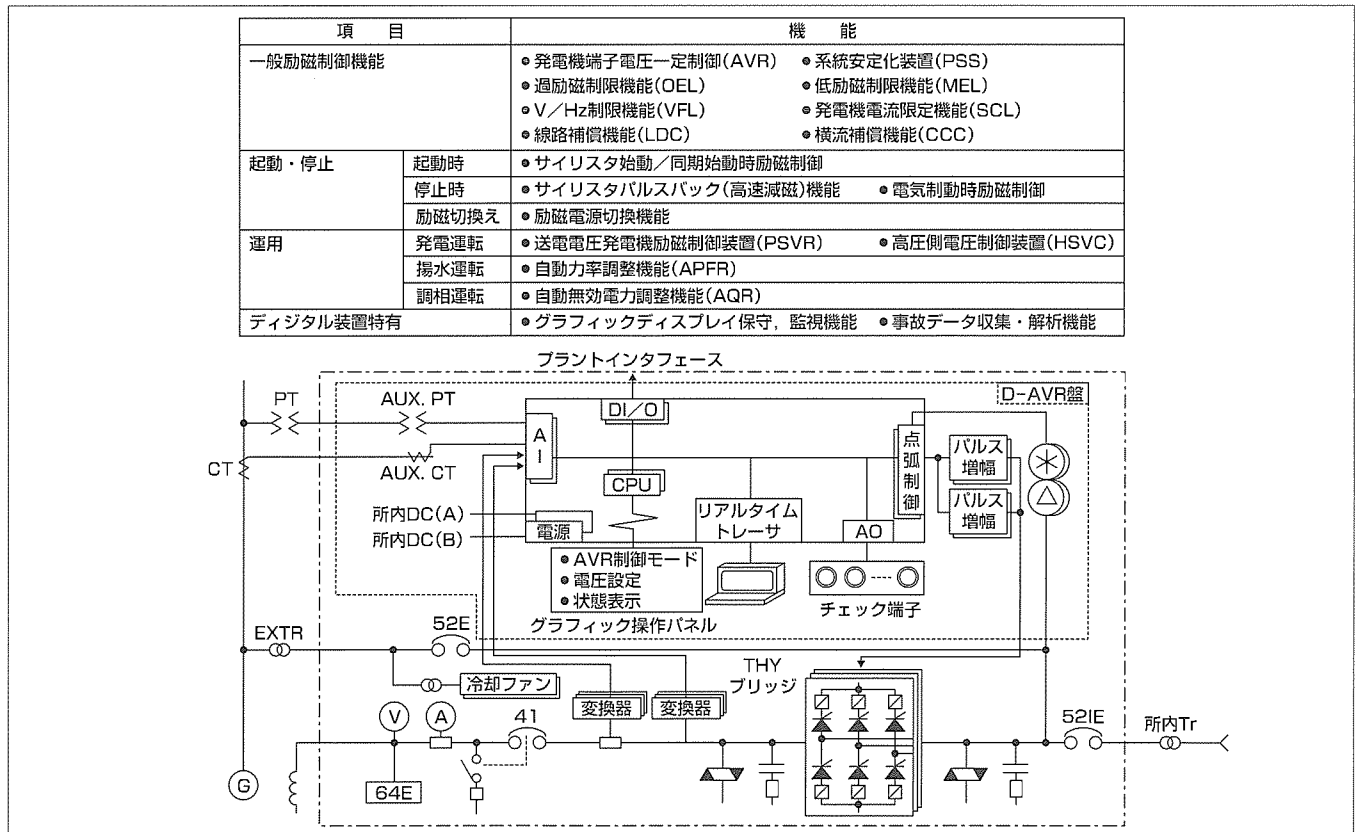
近年、サイリスタ始動方式と同期始動方式を組み合わせたプラントが主流となってきている。これら始動制御には発電電動機の励磁電流を一定に制御する界磁一定制御を行う必要があるが、三菱電機では、この励磁制御を円滑に行うために、起動及び停止途中にサイリスタの点弧制御を有効活用した励磁制御方式を適用している。

(2) 制御装置のデジタル化

デジタル装置の採用に伴い、従来のアナログ装置では実現できなかった監視・操作用グラフィックディスプレイを適用し、また、事故データ収集・解析を可能にしたリアルタイムトレーサ機能を搭載し、操作性、保守性を向上させている。さらに当社二重化システムにおいては、機能部位ごとに二重化を行っているため、十分な信頼性の向上及び装置のコンパクト化を実現している。

(3) 高遮断性能、多頻度開閉性能を持つ界磁遮断器の開発
大型揚水機への適用を考慮して多頻度仕様の界磁遮断器3極型(主極2極+放電極1極)を4極型(主極3極+放電極1極)に改良し、主極1極当たりの遮断電圧を低減させることで遮断性能向上を図った多頻度仕様の界磁遮断器を東京電力(株)のご支援を得て開発・検証を実施し製品化した。

また本稿では、送電電圧の維持を目的とした新しい制御方式である高圧側電圧制御装置についても紹介する。



大容量水力発電所向け励磁制御装置の機能及びシステム構成

デジタル装置を適用した大容量水力発電所に適用される励磁制御装置に要求される制御機能と、大容量揚水発電所向け励磁システム例(デジタル完全二重化システム)を示す。

1. まえがき

水力発電所は火力・原子力発電所とは異なり頻繁に起動停止を繰り返す運用を行うため機器への負担が大きくなることから、経済性・保守性に加えて、これらに対応した制御技術が必要とされる。なかでも発電機の電圧を制御する励磁制御装置は、この発電運転と揚水運転に不可欠で重要な役割を持つ制御装置であることから、非常に高い信頼性・保守性・操作性及び経済性を満足するシステムが要求される。

本稿では、励磁装置のデジタル化に伴う新技術を中心に、特に大容量揚水発電所に適用する励磁制御技術の動向及び三菱電機の技術について紹介する。

2. 大容量揚水発電用励磁制御装置の制御技術

揚水発電所ではサイリスタ起動や同期起動等の揚水始動時及び電気制動時など発電電動機が低回転の状態での励磁を一定に制御する必要があるため、回転要素を持たない静止型励磁方式を採用し、励磁電源には発電機主回路から励磁変圧器を介して供給する自励磁電源のほかに、低回転中の制御に対応し、所内電源を他励磁電源として適用している。また、自励磁回路及び他励磁回路それぞれには遮断器を設置している。

2.1 始動時の励磁制御

サイリスタ起動又は同期起動方式は、停止中の発電電動機に一定励磁を他励磁電源によって供給し、発電機回転速度及び発電機端子電圧が規定値に達すると励磁電源を他励磁から自励磁に切り換え、AVR制御に移行して電圧を確立させる制御を行っている。他励磁回路から自励磁回路への切り換え時は、図1に示すサイリスタ一斉点弧制御を行う。

サイリスタ一斉点弧状態の確認方法は、サイリスタ全数ターンオン状態によって界磁電圧がフルフォーシング状態となることからこの界磁電圧上昇値を検出し、遮断器の切り換え操作を実施している。

この界磁電圧上昇値の設計検証については、EMTDC (Electro-Magnetic Transients Program for DC)^(注1)解析ツールを用いたシミュレーションで確実な電圧上昇値を確認し、試験検証だけでなく設計段階においても十分な信頼性の確保を行っている。

図2にサイリスタ一斉点弧時の挙動を示す。

2.2 停止時の励磁制御

発電電動機停止過程においても種々の励磁制御を実施している。

(1) サイリスタパルスバック制御による急速減磁

サイリスタ点弧角を強制的に大きくし、界磁電圧をマイ

(注1) EMTDCは、MANITOBA社によって開発された電磁過渡現象シミュレーションプログラムである。

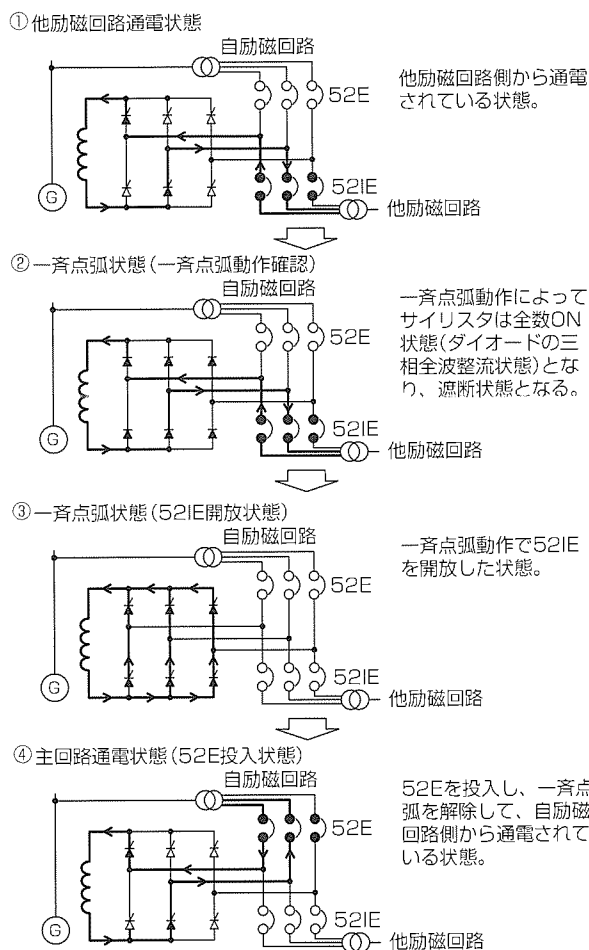


図1. サイリスタ一斉点弧による励磁切り換え

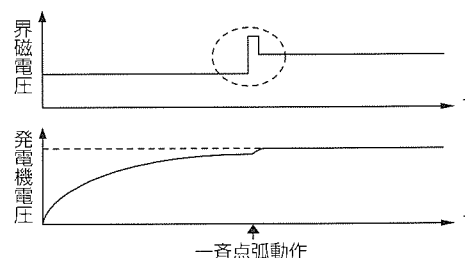


図2. サイリスタ一斉点弧時の挙動

ナスフォーシングさせ、界磁電流を急速に零まで減磁させる機能である。この機能によって界磁遮断器を無負荷遮断させることで、遮断器の長寿命化や停止時間の短縮等に寄与している。

(2) 電気制動時一定励磁制御

回転速度が規定値に低下すると発電電動機に励磁を与えて発電し、電力を消費させ、回転速度を急激に減少させる機能である。発電/揚水切り換え時間の短縮、機械ブレーキ負担軽減に寄与している。

3. 励磁制御装置のデジタル化

当社では、1991年にデジタルAVRを開発して以来、

既に約100台の製作実績を持っており、水力プラントにおいても大容量揚水発電所から中小水力発電所向けに多くの製作実績を持っている。デジタルAVR採用によって次のような性能・操作性・保守性・信頼性・経済性向上を図ることが可能となった。

(1) 高性能・高性能制御

主CPUに32ビットマイクロプロセッサを採用することによって高速演算処理を実現し、制御定数の自動設計、PSS等の制御機能、及び水力プラント向け励磁制御装置の複雑な制御シーケンスが容易に装備可能

(2) 操作性・保守性の向上

自己診断機能と階層化された警報システムの実現、グラフィックディスプレイを採用した操作/監視/定数設定機能、保守ツールによるオンラインモニタ及びリアルタイムトレーサと称している事故データ収集解析機能など操作・保守に有効な機能が充実

(3) 信頼性の向上

機能のソフトウェア化による部品点数・配線量の削減及び多重化システムの構築。当社の多重化システムは、運転継続重視を考慮して機能部位ごとに多重化システムを構築していることが特長

(4) スペースファクタの向上

ハードウェア機器の低減によって盤面数が低減

(5) 経済性の向上

機能の統合化、試験調整及び定期点検の省力化など総合的に経済性が向上

図3にデジタルAVRを採用した励磁装置盤の外観を、図4に操作・監視機能と定数設定機能を持ったグラフィックディスプレイを示す。また、図5にリアルタイムトレーサ事故データ収集解析波形例を示す。

4. 大容量揚水プラント向け界磁遮断器の開発

近年、揚水プラントの大容量化及び系統安定度向上の要求による励磁系頂上電圧の高電圧化により、高電圧・大電流遮断、多頻度の開閉性能を持つ界磁遮断器の適用が必要となってきている。この性能を備えた界磁遮断器が国内外に存在しないため、無負荷開閉回数(10,000回)の性能を持つ界磁遮断器を3極(主極2極直列、放電極1極)から4極(主極3極直列、放電極1極)として遮断性能向上を図った界磁遮断器の開発及び検証を寺崎電気㈱と共同で実施し、良好な結果が得られ、さらに東京電力㈱のご支援を得て大容量揚水発電所に適用した。その新型界磁遮断器の仕様及び特長について紹介する。

(1) 遮断性能

従来の界磁遮断器主極2極直列を3極直列とし、遮断時のアーク電圧を3極に分担させることで1極当たりの遮断電圧を低減させ、遮断性能向上を実現できた。

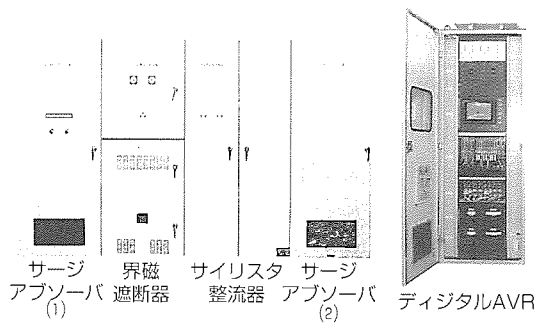
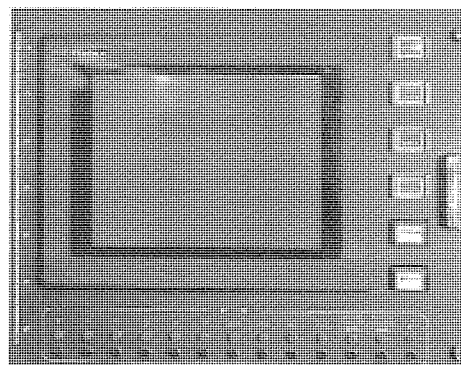


図3. デジタルAVRを採用した励磁装置の外観



ディスプレイの外観



表示画面例(メニュー画面)

図4. 操作・監視機能と定数設定機能を持ったグラフィックディスプレイ

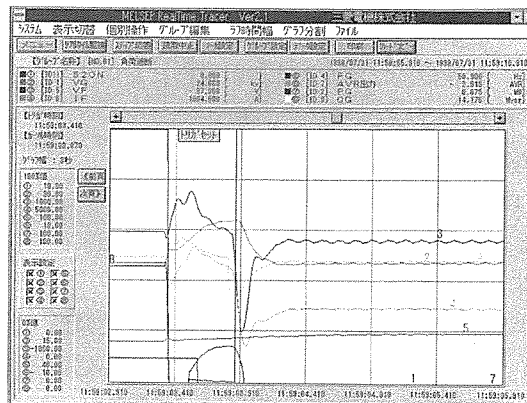


図5. リアルタイムトレーサ事故データ収集解析波形例

(2) 構造

枠体には4極型(三相4線式用)交流遮断器のものを適用することでコンパクト化が実現できた。

(3) 信頼性

主構造体の投入スプリング、引出し端子、コンタクト、操作機構等は使用実績のある既存の界磁遮断器及び交流遮断器のものを採用することで新規要素を極力少なくし、十分な信頼性を確保することができた。

図6に新型(4極型)界磁遮断器の外観を示し、表1に新型(4極型)界磁遮断器の性能を示す。

5. 高圧側電圧制御装置(HSVC)の開発

近年、電源の遠隔地化・集中化によって長距離大電力の安定輸送が重要な課題となっており、送電電圧制御発電機

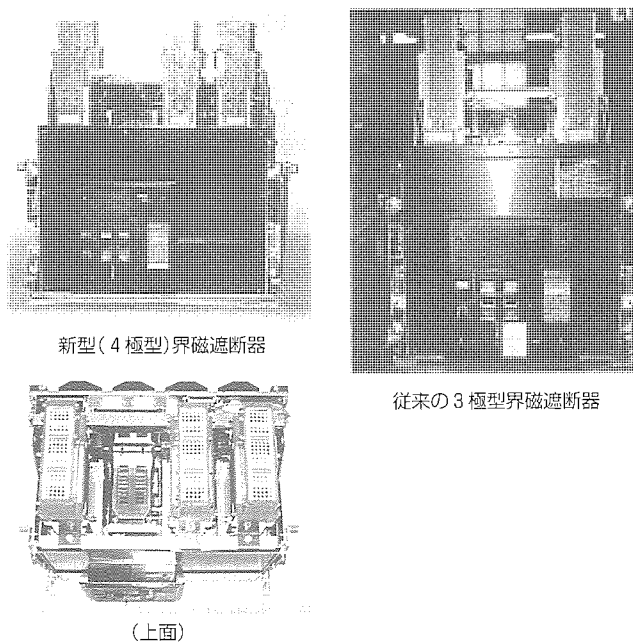


図6. 新型(4極型)界磁遮断器の外観

励磁制御装置の設置、定電力負荷の増加による電圧安定度の低下に対する改善(SVC等の設置)、複合の電力動揺モードの抑制(複数入力PSS)等の安定化対策が実施されている。

当社では、励磁制御装置のデジタル化のメリットを生かし、励磁装置に搭載可能な主変圧器高圧側電圧制御方式の開発を行っている。この装置は次の特長を持っている。

- 主変圧器高圧側の電圧フィードバックが不要
- 運用上要求される主変圧器高圧側電圧を設定(指定)可能
- 適切な位相補償要素を付加することによって電力動揺の抑制が可能
- 垂下率を持ち他の発電機との安定した変列運転が可能
- 発電機の励磁装置に適用できるため、発電設備の有効活用で電圧安定度改善が可能

この制御方式は原子力・火力・水力発電所のすべての励磁装置に適用が可能であるが、特に長距離送電線を使用して送電されている水力発電所群の安定度改善策、送電損失低減に有効である。

(1) システム構成と基本制御

HSVCでは、発電機端子電圧VGを次のように制御することから、高圧側電圧信号のフィードバックは不要となる。

$$VG = VH_{ref} + (X_t - XDR) I_q$$

この結果、高圧側電圧(VH)は次のように維持できる。

$$VH = VH_{ref} - XDR \cdot I_q$$

図7にHSVCのシステム構成を示す。

またHSVCは、上記基本的な高圧側電圧制御に加えて次のオプション機能を組み込むことができる。

- 無効電力補償機能
- 無効電流補正基準値追従機能
- 主変タップ位置のフィードバックによる垂下率

表1. 新型(4極型)界磁遮断器の性能

No.	項目	大容量機の要求仕様(例)	従来型(3極型)		新型(4極型)	
			性能	評価	性能	評価
(1)	定格界磁電圧	350V	500V	○	750V	○
(2)	最大界磁電圧	1,161V	2,700V	○	2,200V	○
(3)	耐圧試験電圧	3,500V	5,000V	○	5,000V	○
(4)	連続定格電流	2,150A	4,000A	○	3,000A	○
(5)	最大界磁電圧時遮断電流	24kA(1,161V)	14kA(2,000V) 40kA(700V)	×	16kA(2,200V) 30kA(1,200V) 40kA(1,000V)	○
(6)	交流側短絡時直流分最大電圧	2,125V	2,000V	×	2,200V	○
(7)	交流側短絡電圧時の遮断電流	15,857A	14,000A	×	16,000A	○
(8)	瞬時耐電流, 投入電流(放電極)	19,029A	18,600A	×	19,400A	○
(9)	1 / 2秒間短時間電流(放電極)	15,857A	14,000A	×	16,000A	○
(10)	遮断電流(放電極)	2,150A	4,000A	○	4,000A	○
(11)	無負荷開閉回数	10,000回	10,000回	○	10,000回	○

水車调速機制御における技術動向

三宮靖典* 藤森貞暢***
 若林 聖* 曾我泰経***
 中島 満**

要 旨

水力発電所向け调速機に関する最近の技術動向として一軸型電気リターン方式と電動サーボモータ方式について紹介する。

一軸型電気リターン方式调速機は、高速大容量・高落差のポンプ水車への適用を目的として、従来の機械リターン方式からリターン・リンク機構を省略し、调速機制御盤からの制御指令を機械的ストロークに変換する制御器と配圧弁を一軸構成とし、経年劣化部分を削減して、保守性の向上、コンパクト化・簡素化によるコストダウン、応答性の改善等を目指した。

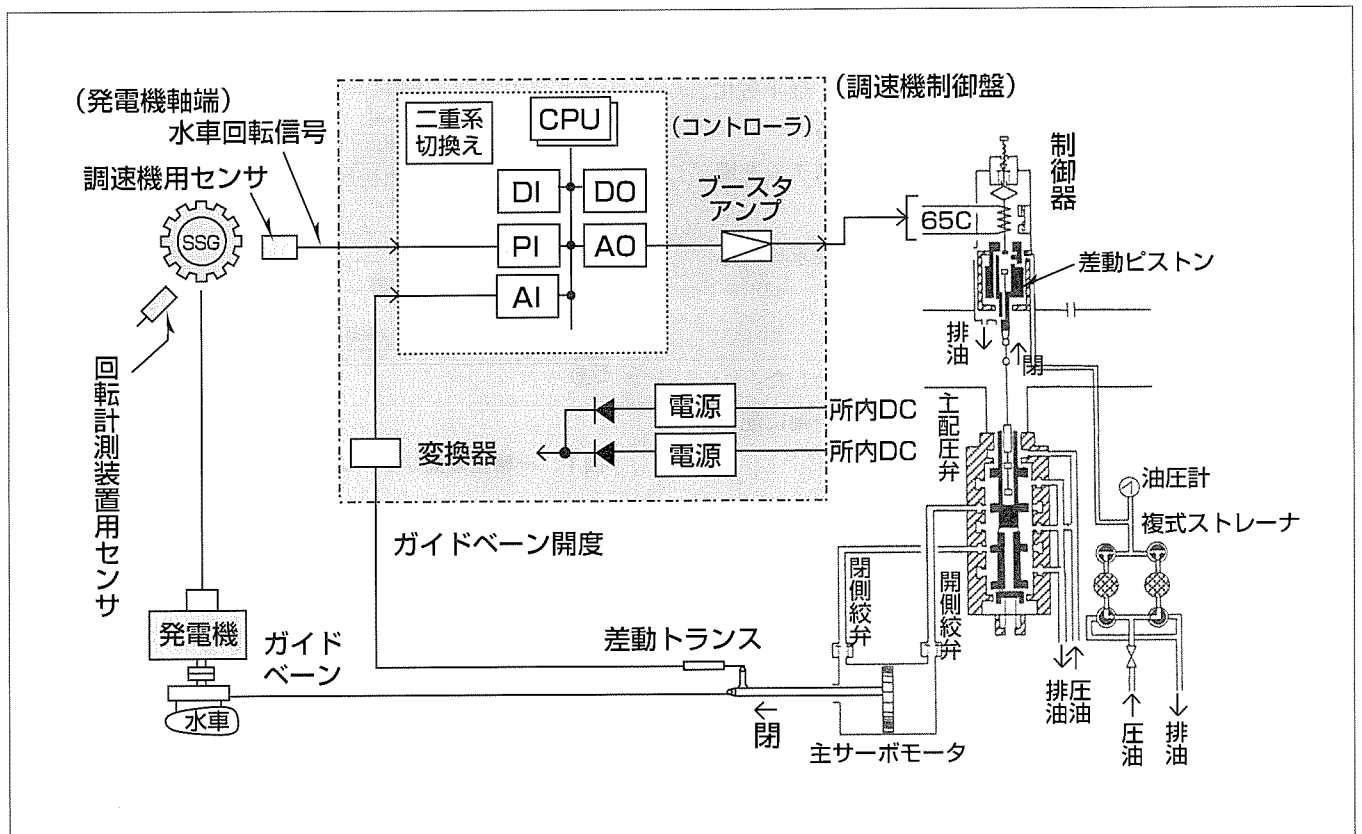
その主要な開発要素は、制御器と、ガイドベーン開度を直線的に検出する差動トランスである。前者については、印加電流、ストロークとも増加するため、熱設計及びエアギャップの磁束解析結果から要求仕様が満足できることを設計検証し、良好な結果を得た。また、制御器と差動ト

ランスに対して実機相当の長期使用状態を模擬した加振試験を実施し、問題のない結果を得た。

これらを適用して调速機組合せ検証試験を実施した結果、従来の機械リターン方式调速機をりょうが(凌駕)する良好な結果が得られ、一軸型電気リターン方式の優位性が確認された。

上記のシステムを東京電力(株)葛野川発電所2号機において実証試験を行ったところ良好な結果が得られた。

一方、電動サーボモータ方式调速機は、制御方式を油圧サーボ方式と共通化・標準化することにより、設計と現地試験時間の削減が可能となった。また、10kW未満の出力の電動サーボモータに関しては、電源のDC110V化を完了し、従来設置されていた非常用インバータ等を省略可能とした。



一軸型電気リターン方式调速機システムの構成

制御器と配圧弁を差動ピストンを介して一軸に配置し、かつガイドベーン開度を差動トランスで検出し、デジタル式调速機制御盤へ電気的にフィードバックする。

1. ま え が き

電力業界を取り巻くコストダウンの要請は水力発電所についても例外でなく、調速機(ガバナ)についても製作・保守コストの低減を図っている。また、制御性・応答性・操作性の向上についても、システムの簡素化・合理化によって検討が進められている。

本稿では、三菱重工業㈱及び三菱電機(以下、当社)で簡素化・合理化・性能向上を目指して揚水及び一般水力用に開発検証を行った一軸型電気リターン方式調速機(油圧式)についてその開発目標、検証結果、実機試験結果について述べ、併せて、中小水力発電所向けに主流として適用される電動サーボモータ方式調速機の技術動向を示す。

2. 一軸型電気リターン方式調速機

2.1 開発内容

2.1.1 開発目標

最近の揚水発電所に適用されるポンプ水車は高速大容量・高落差化の傾向にあり、調速機にもその性能を十分踏まえた制御特性の実現が要求される。これに加えて、給電上の運転要求にこたえる応答性の向上と保守の簡素化も重要な課題である。このため、従来の調速機の見直しを行い、下記目標を設定した。

- 高速大容量・高落差のポンプ水車に適用する。
- 機械的なリターンとリンク機構を省略し、経年劣化部分を削減して、保守性の向上を実現する。
- コンパクト化によって経済的な調速機システムを構成する。
- 特性向上によって給電上・運転上の応答要求に対応する。

2.1.2 一軸型電気リターン方式調速機の特長

開発目標実現に向け、下記の特長を持つこととした。

- 制御器と配圧弁を差動ピストンを介して一軸に配置し、リターン機構を省略する。
- 制御器・差動トランス等の開発品に対し振動試験を実施し、耐振性能を確保する。
- デジタル制御部に監視・操作を行うグラフィックパネルと各種データの収集・解析を可能としたリアルタイムトレーサ機能を付加し、保守性・操作性を向上させる。

一軸型電気リターン調速機のシステム構成を図1に、また、比較のため、従来の機械リターン方式のシステム構成を図2に示す。図1中、*印の箇所が今回の開発検証のポイントである。また、一軸型の場合は、ゴロ回し、メタル慣らしを含むすべての操作を調速機制御盤から電気

的に行うこととし、負荷制限手動ハンドルを省略した。

2.1.3 開発品の仕様と検証内容

一軸型電気リターン方式調速機を構成する開発品要素の仕様及び検証内容について以下に述べる。

(1) 制御器

制御器と配圧弁を一軸配置とするため、従来の両者をリンクで結合していた機械リターン方式と比較し、制御指令電流を機械的ストロークに変換する制御器に対する要求仕様値が増大する。これに対して、可動コイルの指令電流とギャップの磁束によって電磁力を発生させる原理及び寸法を大きくした葉状パネの材質は従来どおりとし、要求仕様を満たすための新設計を実施した。その内容と検証項目は以下のとおりである。

(a) 熱設計

可動コイル印加電流が大きいため、熱計算及び実測値の比較を実施した。最大電流が過渡的に印加される負荷遮断時を模擬したケースでは、温度上昇値は設計値以内であり、良好と判定された。また、実際には発生し得ない最大電流連続印加の場合も、制御器各部温度は設計値以内で飽和し、コイルの断線等は発生しないことが確認された。

(b) エアギャップ磁束分布解析

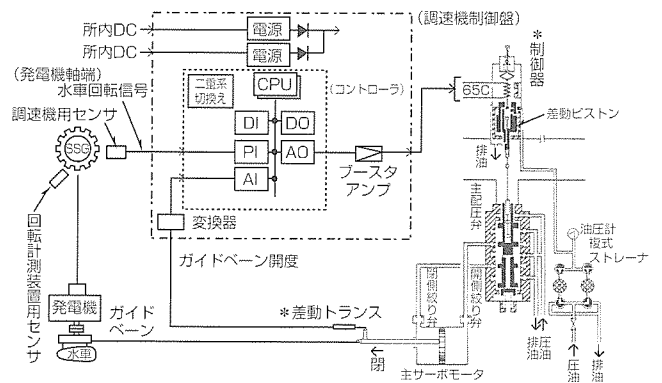


図1. 一軸型電気リターン方式調速機のシステム構成

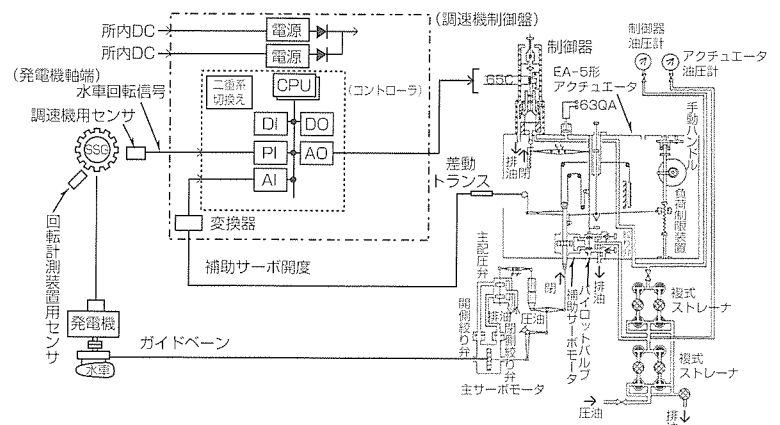


図2. 機械リターン方式(従来型)調速機のシステム構成

可動コイルストロークが大きいため、制御器鉄心とエアギャップの磁束密度解析を実施し、電気(電流)／機械(ストローク)変換ゲインの確保を確認した。

(c) 長期加振試験

ポンプ水車の振動成分を考慮して、振幅・加速度を増加させ、25年間使用(稼働率1／3)を模擬した加振試験を実施した。加振後に非破壊検査を実施したが、各部の異常・破損は発生しなかった。

(d) 静特性・動特性試験

制御器に差動ピストンを連結した状態でピストンに操作油圧(2～7 MPa)を通じ、制御器入力電流と差動ピストンストローク間の特性を採取した。良好なゲイン、ヒステリシスの各静特性のほか、過渡応答試験においては設計値以内の応答時定数が得られ、周波数応答試験においては共振点のないことが確認された。

(e) 配圧弁との連結

以上の検証で制御器単体の特性は確認されたので、配圧弁との一軸連結を行った。この状態を図3に示す。

(2) 差動トランス

直線状ストロークの検出に広く適用されている差動トランスを、ガイドベーン開度検出のため、水車ピット内のガイドベーンサーボモータ近傍に設置した。したがって、耐振性能の把握を目的に、連続加振試験を実施した。

加振試験の内容は固有振動数の計測と共振点時における耐久性確認、始動時又は事故時を想定した差動トランスロッドの繰り返し動作試験による耐久性確認、規定回数の振動印加後の分解検査、非破壊検査及び磨耗検査等であり、いずれも実使用に対して問題のないことを確認した。

実機水車ピットに設置した状態を図4に示す。

(3) 工場組合せ検証試験

単品検証の完了した制御器に配圧弁を結合し、差動トランスとガイドベーンサーボモータを連結して、調速機制御盤との組合せ試験を電気協同研究第45巻第1号「水車付帯

設備の工場試験基準」⁽¹⁾の調速機試験の項に従って実施した。特に不動時間測定と不動帯測定においては、従来より良好な値が得られ、補助サーボモータを省略した一軸型電気リターン方式の性能の優位性を確認した。なお、この試験の操作油圧は、5 MPaのほか、今後適用が予想される7 MPaについても実施し、同様の結果を得た。

2.2 実機仕様

2.2.1 制御器・差動トランス

これらの要素は開発品と同一仕様で製作され、開発品と同様の特性が得られることを確認した。

2.2.2 調速機制御盤

調速機制御盤は、CPUのソフトウェアによってガバナロジックを構成する。基本的に従来からのPID制御を踏襲しており、可動翼水車のランナ制御機能として、立体カムに代わる特性をソフトウェアで構成することも可能である。また、デジタル制御装置として、電気協同研究第48巻第3号「水力発電所デジタル制御装置の標準仕様」⁽²⁾に基づく工場試験を実施した。

一軸型電気リターン方式の開発と並行して、調速機制御盤においても、下記の新技术適用を行った。

(1) グラフィックパネルの適用

従来、調速機に関する運転状態及び警報表示は、調速機盤の回転計、バランスメータ、ガイドベーン開度／負荷制限位置指示計、電力計のほか、調速機制御盤の表示パネルで表示を行ってきた。しかし、限られたスペースでこれらの表示のほか現場調整操作、故障表示(履歴表示を含む)、各設定値の確認と変更を一元的に可能とするため、今回、グラフィックパネルを設置した。

各画面の切換え／確認／設定操作はタッチオペレーションによる。また、機器操作である回転速度／負荷の各増減操作は微調整が可能であり、従来の手動ハンドルと同等の操作が可能のように配慮した。

(2) リアルタイムトレーサ機能(オプション)

調速機制御盤に入力した特定データのキック条件前後の

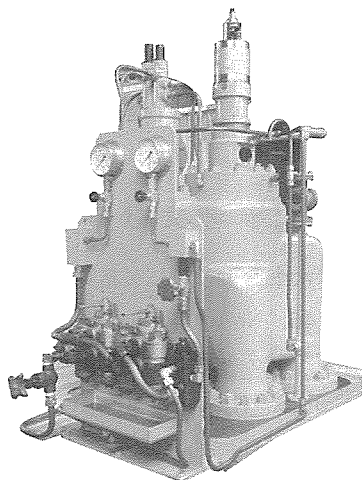


図3. 制御器と配圧弁の一軸連結状態



図4. 水車ピット内の差動トランス

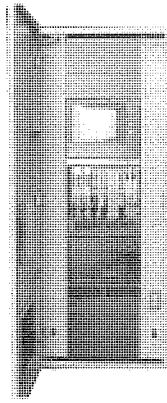


図5. 調速機制御盤の外観(一例)

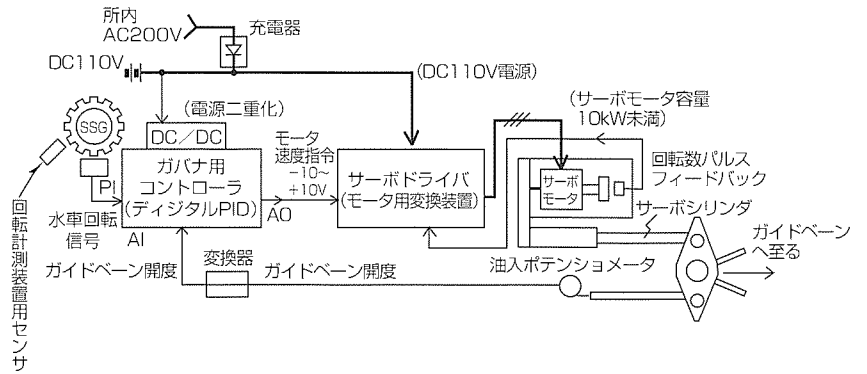


図6. 直流電源型電動サーボモータ方式のシステム構成

記録が可能なりリアルタイムトレース機能をオプション装備している。専用パソコンとプリンタを接続することでプリントアウトできる。過渡応答，負荷遮断のような試験時のほか，異常負荷変動時等の解析が可能である。

(3) システム多重化構成

デジタル式水車調速機のシステム構成は下記とすることを基本としている⁽³⁾。

- CPU：電気協同研究X級；二重，Y級；一重
- PIO：一重を基本
- 電源：二重

稼働率や給電上重要な揚水発電所に対しては，PIO二重化に対応可能なメニューを追加した。

調速機制御盤の外観の一例を図5に示す。

2.2.3 SSG

回転速度検出を行うSSGに関しても，インダクタとギャップセンサの改良を行い，軸振れの大小に関係なく検出信頼度向上を実現した。この改良に当たり，無拘束速度時の想定値を上回る軸振れ値を与えた工場回転試験を実施し，回転速度検出が正常に行われることを確認した。

2.3 実機試験結果

以上述べた一軸型電気リターン方式調速機(PIO二重化仕様)を，東京電力㈱の御支援によって葛野川発電所2号機に適用した。発電・揚水各方向の運転及び負荷遮断・入力遮断等の試験結果は良好であり，今回開発した調速機が高速大容量・高落差のポンプ水車に十分適用可能であることが実証された。

3. 電動サーボモータ方式調速機

3.1 適用範囲

圧油を必要としない電動サーボモータ方式調速機は，当社においても，単機出力20MW以下のクラスの新規及び大改修プラント向けに広く準備している。対象水車はフランスのみならず可動翼のチューブラ水車にも対応でき，電動サーボモータによるランナ制御も可能である。また，カ

プラン水車のランナベーンの電動サーボモータ化についても工場検証試験を完了した。

3.2 制御方式

電動サーボモータ方式についても，制御方式の見直しを行い，油圧方式と同一の制御ロジックを採用した。その結果，電動/油圧の方式に関係なく同一調速機制御ソフトウェアを適用し，個々のプラントの仕様の差異に対してはシミュレーションによる最適定数の選定とその設定のみで対応できることとなり，設計及び現地調整時間の大幅な削減が実現できた。

3.3 電源方式

調速機用電動サーボモータ駆動用変換器(サーボドライバ)のDC110V電源化を推進し，サーボモータ出力10kW未満の範囲について完了した。これにより，このクラスでは調速機非常用電源として設置していたインバータを不要とした。この構成を図6に示す。

4. むすび

以上，新規開発の一軸型電気リターン方式調速機を主体に，最近の電動サーボモータ方式調速機も含めて説明した。

今後，デジタル式水車調速機の製作に当たっては，経済性はもちろんのこと，保守不要かつ寿命が長く環境に配慮した製品を供給することが必要となる。

最後に，当社水車調速機に関して御指導・御助言を賜った関係各位に厚く御礼申し上げる次第である。

参考文献

- (1) 水車・ポンプ水車および付属装置の工場検査基準：電気協同研究，45，No.1，65～81 (1989)
- (2) 水力発電所デジタル機器の標準仕様：電気協同研究，48，No.3，25～35 (1992)
- (3) 水車付属設備の設計指針：電気協同研究，42，No.2，9～11 (1986)

プラント状態監視システムの最新技術

町野利太*
矢倉武宜*

要旨

水力発電所は1960年代の遠方制御化以降ほとんどが無人化されてきた。これに伴い、以下のような現象が出てきた。

- 人間の五感による機器状態の監視が常時できないため、初期段階での異常兆候を発見しにくい。
- 機器詳細データを常時連続で読み取ることができない。

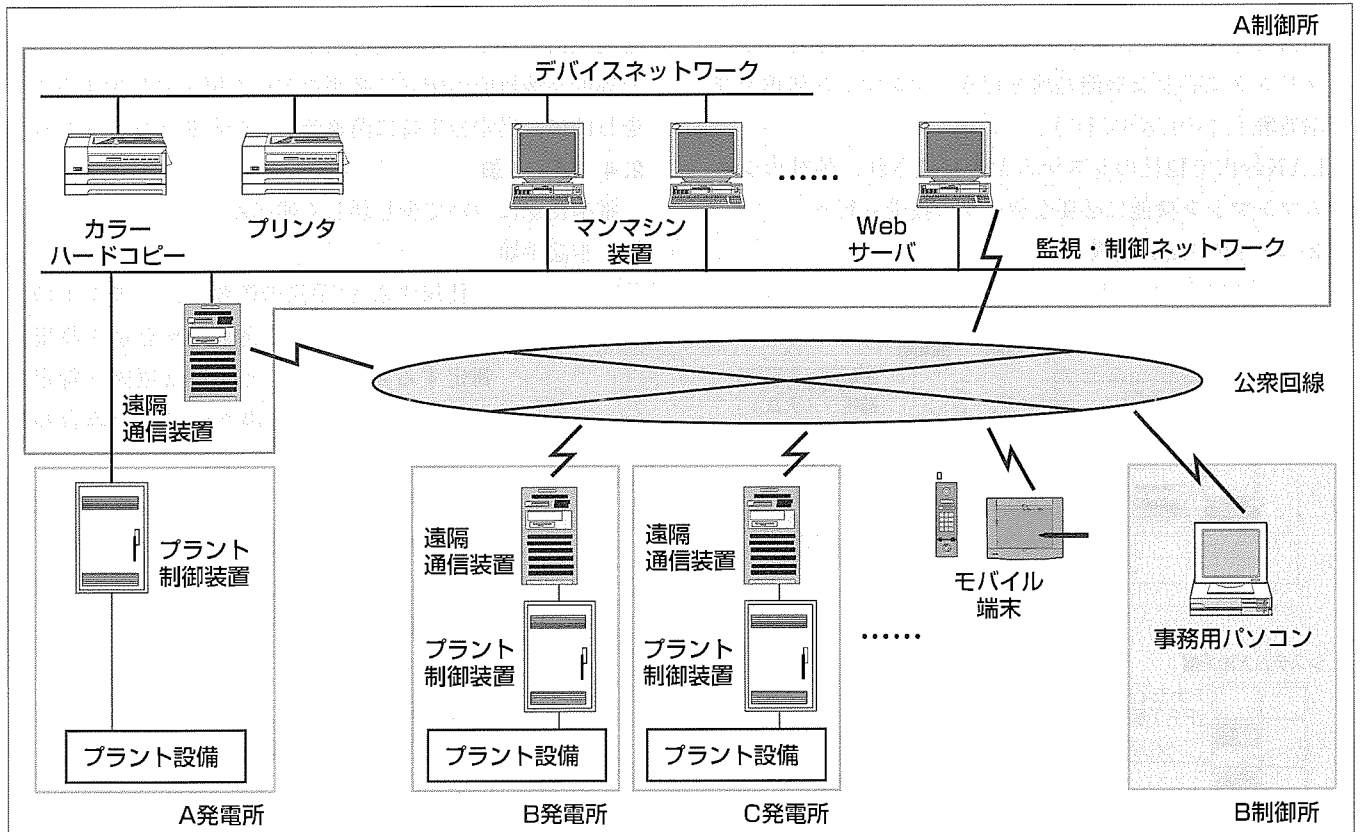
この対応方法として、機器監視を機械化することが考えられ、機器状態監視装置を適用して監視を強化する方法が挙げられる。

一方で、最近のイントラネットの急速な普及に伴い、電力分野においても、情報の共有化・オープン化・マルチメ

ディア化が求められ、JavaやWeb技術を応用した情報システムの適用が加速している。

従来は監視制御室の専用端末による監視制御を行っていたが、事務室や自宅等の事務用パソコン、又は現場におけるモバイル端末での監視ができるシステムが求められている。この要求に対応するために、インターネットやマルチメディア等の汎用技術を応用することで場所や時間の制約を受けない監視システムが実現できる。

本稿では、これら汎用システム適用のプラント状態監視システムについて紹介する。



水力発電所向け集中監視制御システム

プラントの監視・制御系と情報・通信系を総合的に融合したシステムである。

従来の集中監視制御システムに対する高度化・多様化のニーズに対応するため、監視機能に状態監視機能を加え、さらにイントラネット技術を応用して、事務所や出張所などの分散拠点や自宅における不特定多数の端末での監視を可能としている。

1. ま え が き

水力発電所は集中制御化に伴いそのほとんどが無人工化されてきたが、一方で、運転員が機器の詳細な運転状況を把握するには困難な面があり、定期的に巡視を行っている。このため、発電所設備の詳細な運転状況を常時監視し異常の兆候を初期段階で発見することで電力系統運用に影響を与える事故の拡大を防止することが期待できる。

本稿では、プロセスデータから異常兆候検知、対応操作の推論機能を持った揚水発電機器状態監視システムと、制御装置から収集したデータをブラウザソフトウェアで情報閲覧を行う水力発電所遠隔保守支援システムについて紹介する。

2. 揚水発電機器状態監視システム

このシステムでの機能は、プラントデータ入力処理機能、監視に必要なデータ処理とモニタ機能、及び推論機能である。マンマシン処理やプロセス入力処理を常時行いながら、診断問題に有力な定性推論を応用した柔軟な診断と時々刻々と発生する推論要求のリアルタイム処理を実現する。

2.1 システム概要

システムは図1に示すエンジニアリングワークステーション(EWS)と入出力装置で構成される。プロセス信号は入出力装置からEWSへ取り込み、EWSで入力処理及びモニタリングに必要な機能処理を行う。マンマシン処理及び推論処理もこのEWSで行う。

LAN経由で他社のシステムとも接続され、他社のシステムマンマシン機能に必要なデータの授受も行う。

2.2 ハードウェア構成

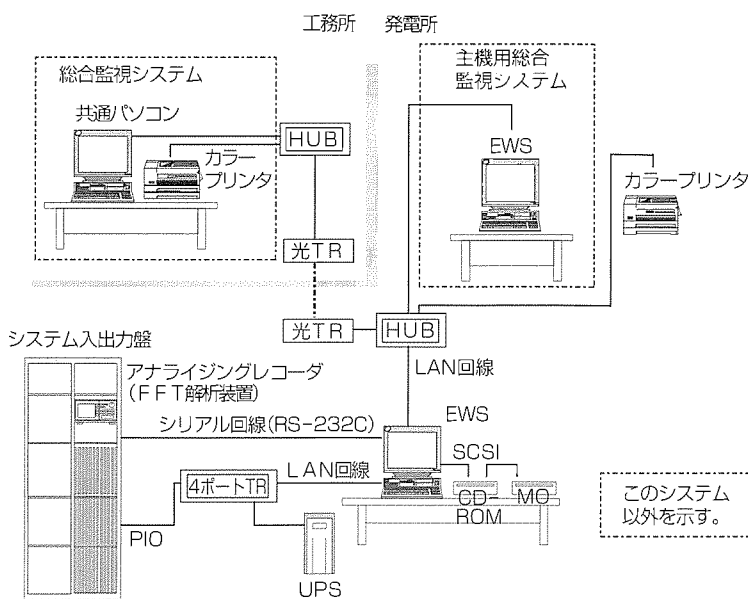


図1. システム構成

このシステムは次の機器で構成される。

(1) EWS

入出力装置からプロセス信号を入力し、プロセスデータの収集・蓄積、データの表示、及び異常兆候判定処理を行うための機器である。

(2) カラーディスプレイ装置

EWSに接続するモニタで、マンマシン機能を行うための機器である。

(3) 入出力装置

センサ等からのプラント状態信号をEWSの信号仕様に合致させるための変換を行う機器である。

2.3 ソフトウェア仕様

(1) データ処理機能

プラントからのプロセスデータを一定周期で入力処理し、データ保存、傾向データ計算、トレンド処理等を行う。プロセスデータは、外部媒体へ任意に保存を可能とする。

(2) マンマシン機能

プラントのオンライン監視(グラフィック系統図、運転時間表示)、履歴監視(トレンドグラフ)、異常時の状態、推論結果/推論根拠、各機能ごとに自動保存された過去データなどをCRTに表示する。

(3) 推論処理機能

異常兆候検出機能として異常兆候の早期検出によって異常発生前や発生初期に適切な処理を可能とすること、用いた運転支援機能の確立に必要なデータ解析に使用することを目的に、異常発生時に関連データの収集と保存を行う。

2.4 推 論

推論機能について少し詳しく述べる。

(1) 推論手順

使用するAI手法の概要は、プラントの動作状態をチェックし異常兆候を示す設備を判定する定性モデルと、異常原因を特定する手法を利用した知識ベースを組み合わせた構成である。

定性モデルとは、プラント設備の機能仕様や物理的な特性を用いてプラントの正常状態を記述した知識ベースである。設備の機能仕様や特性を記述しているため、標準化が可能で複雑なプラントも設備単位で知識を記述することが可能であり、プラント全体を対象とした異常設備の監視に適している。

ルールベースとは、条件と帰結を組み合わせで記述した知識ベースで、個々の現象、原因記述を簡潔に記述できる特長がある。規定する知識の記述が簡単で取扱いが容易で、ある程度限定した範囲の推論に適する。

異常現象発生時にモデルベース、ルールベース推論を用いるようにしており、二つの推論方式の長所を生かした方式を採用している。

このシステムにおける推論手順は大きく以下の五つとなる。また、その流れを図2に示す。

(a) 異常検知

周期的に入力するプロセスデータと正常時のプラント動作特性とを常時比較し、逸脱したものがあれば警報発生と以降の推論を行う。

(b) 異常検知詳細内容導出

異常検知と判定したロジックの詳細内容を提示する。

(c) 異常設備特定

機器・装置に関する機能・構造・特性を定性的に整理したモデルを用いて異常箇所の特定を行う。まず上位(大局的な)モデルで大まかな絞り込みを行い、その後、下位(詳細な)モデルを用いて異常箇所を更に限定していく。

(d) 異常推定原因特定

異常原因を特定するためのノウハウを知識化した原因判定知識を運転員と対話を行いながら切り分け、故障原因を特定する。

(e) 対応操作ガイド導出

故障原因箇所及び故障要因を決定し提示する。

(2) 異常診断表示機能

異常診断表示機能として以下を備えている。

(a) 状態異常一覧・推論結果表示

推論機能で検出された警報ごとに、警報名、発生時刻、優先度、推論の段階を一覧表示する。また、異常検知詳細内容、異常設備、異常推定原因、対応操作ガイドを表示する。画面例を図3に示す。

(b) 推論根拠表示

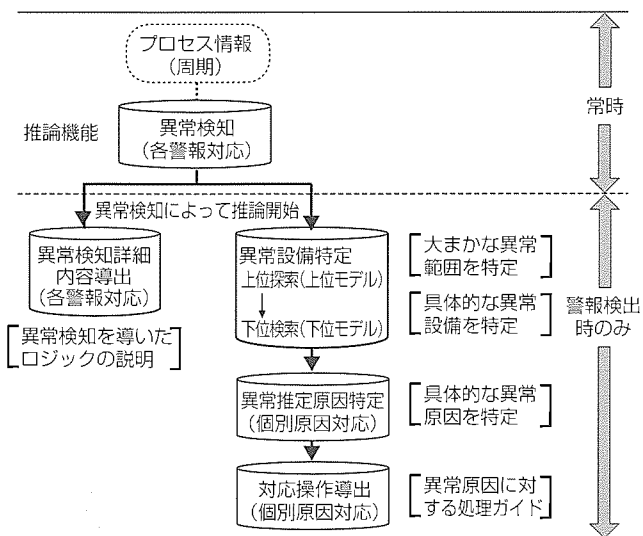


図2. 推論手順フロー

警報を検出した判断過程(異常検知根拠画面), 異常設備を特定した判断過程(設備特定根拠画面), 異常原因を特定した判断過程(原因判定根拠画面)を表示する。画面例を図4に示す。

(c) 関数グラフ

発生している警報に関連する警報グラフを表示する。

(d) 質問

推論の途中において発生した質問を表示し、それに対する回答(Yes, No)を入力する。

3. 水力発電所遠隔保守支援システム

発電所内に設置するWebサーバで制御装置CPUから収集したデータをHTML化することによって遠隔地に設置された端末上のブラウザソフトウェアで保守支援情報を閲覧できるもので、Webサーバ、ブラウザソフトウェアは

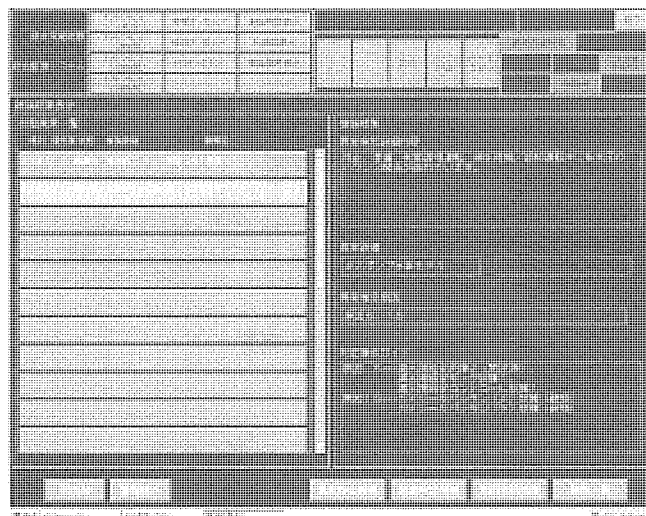


図3. 異常状態一覧・推論結果表示画面

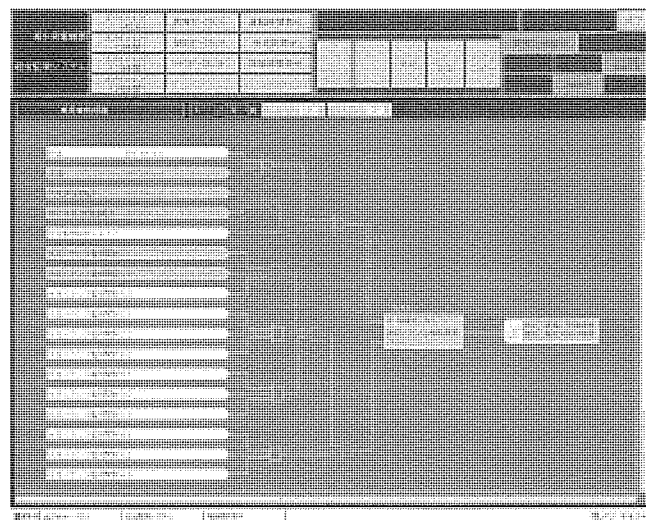


図4. 推論根拠表示画面

汎用のものを適用し、構成の簡素化を図るものとする。

3.1 システム概要

システムは図5に示すWebサーバと保守用端末で構成される。

Webサーバは、イーサネットを経由して定周期で制御装置CPUから情報データの収集を行い、そのデータをHTML化しハイパーテキストを作成する。

保守用端末は、アナログ回線を経由してWebサーバと接続して、ブラウザソフトウェアによってHTML化された情報のハイパーテキストを表示する。

情報データのハイパーテキスト作成を定周期で行い、保守用端末のブラウザソフトウェアでのハイパーテキスト表示を更新させることによって最新の情報を提供する。

3.2 ハードウェア構成

システム構成を図6に示す。

このシステムは次の機器で構成される。

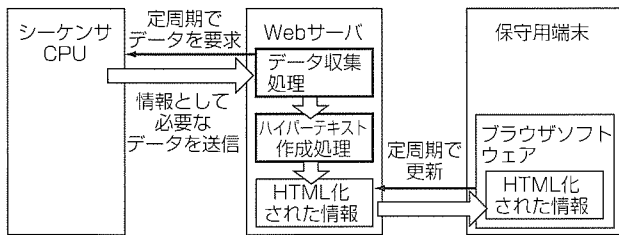


図5. システム概要

(1) Webサーバ

制御装置CPU，端末に接続されるサーバ本体で，保守支援情報を収集しHTML化するための機器である。

(2) カラーディスプレイ装置

Webサーバ本体に接続するモニタで，保守を行うための機器である。

(3) 保守用端末

遠隔地において発電所のWebサーバに接続する端末で，情報を表示するための機器である。

3.3 ソフトウェア仕様

このシステムを構成するWebサーバと保守端末で使用するOSとブラウザソフトウェアを表1に示す。

このシステムで情報を表示するためのWebサーバ側，保守端末側の機能仕様を以下に示す。

(1) Webサーバ機能

各制御装置のCPUから情報データを収集し，そのデータを基に親局のブラウザで表示するためのハイパーテキストを作成する処理を定周期で行う。

Webサーバと制御装置のCPU間の伝送は，UDP/IPプロトコルを用いる。

伝送はWebサーバ側主導で行い，Webサーバの受信要求でシーケンサのCPUからデータを送り返してもらう手順となる。

(2) ハイパーテキスト作成機能

保守端末側のブラウザで情報データを表示するため，取

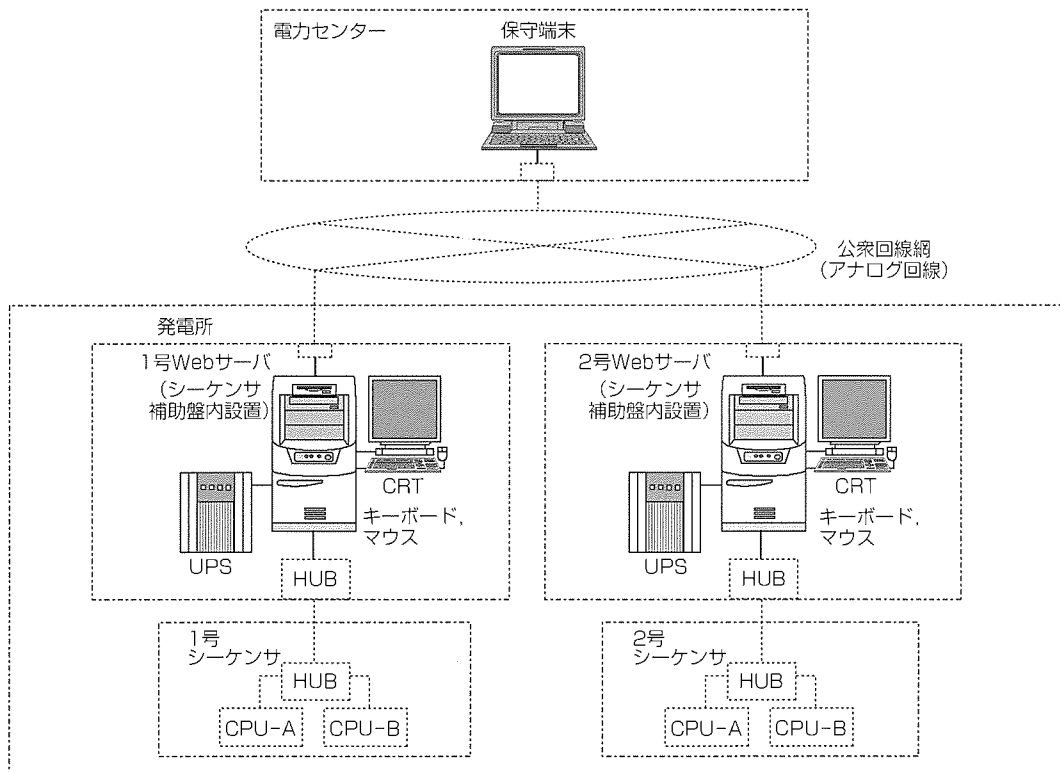


図6. システム構成

表1. OS, ブラウザソフトウェア

親局(保守端末)	OS	Windows 日本語版 (マイクロソフト社)
	ブラウザソフトウェア	NetscapeNavigator 日本語版 (ネットスケープコミュニケーションズ社)
子局(Webサーバ)	OS	Windows 日本語版 (マイクロソフト社)

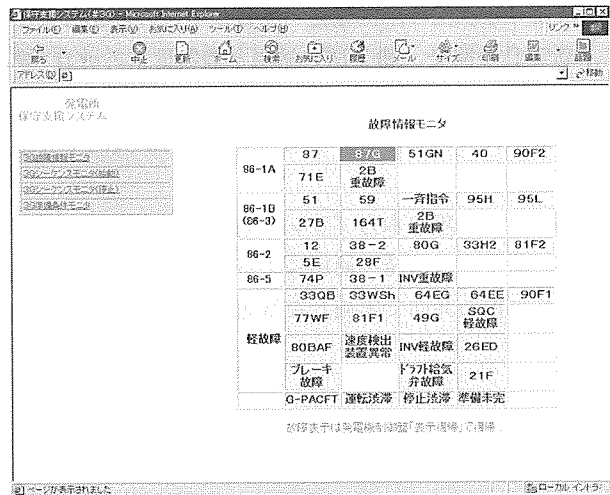


図7. 故障表示モニタ画面

集されたデータを用いてハイパーテキストを作成する。ハイパーテキストはデータ収集周期に合わせて更新する。

(3) 履歴データ保存機能

あらかじめ設定されたイベント発生によるタイミングでプロセスデータを保存する。

(4) 保守端末機能

Webサーバ上で定周期に更新されるハイパーテキスト化された情報データを、ブラウザで表示する。

保守支援情報の画面は、Webサーバで作成したハイパーテキスト化されたデータを、保守端末のブラウザで開くことで表示する。

ハイパーテキストのリンクによる画面展開以外はブラウザの機能によるものである。

画面例を図7～図9に示す。

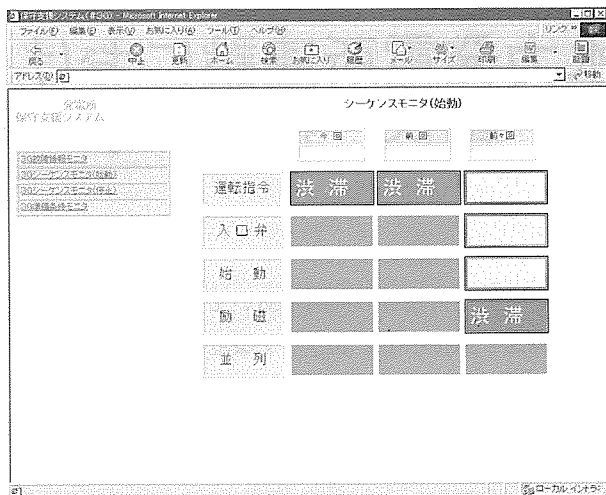


図8. シーケンスモニタ 渋滞ステップ選択画面

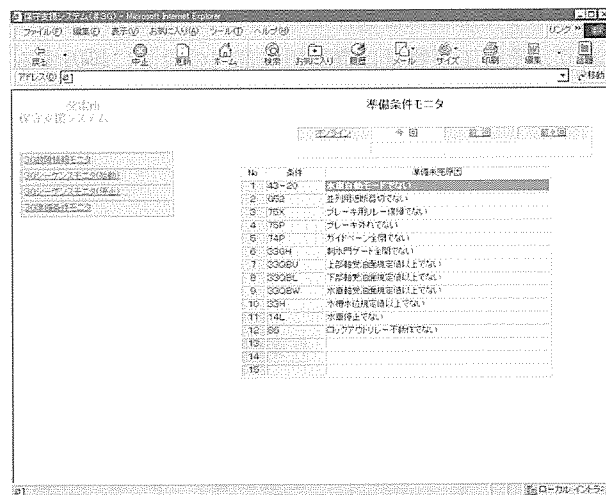


図9. シーケンスモニタ 渋滞表示画面

4. む す び

水力発電分野における監視制御、情報通信系への取組について、最新のシステムを事例にして紹介した。今後も技術革新、コスト低減の要求に追従し、最適なシステムの構築と提案に向けて努力していく所存である。

水力発電所建設における 輸送・据付工事の最新技術

鈴木重則*
塚田光政*
川人真佐行*

要旨

近年の電力設備投資の抑制とあいまって水力発電所建設工事の輸送・据付工事を取り巻く環境は作業員の高齢化及び熟練作業員の減少化が懸念される中、工事部門である三菱電機プラント建設統括部は、技術の伝承、施工品質の維持・向上、及び輸送・据付工事の合理化に努めている。

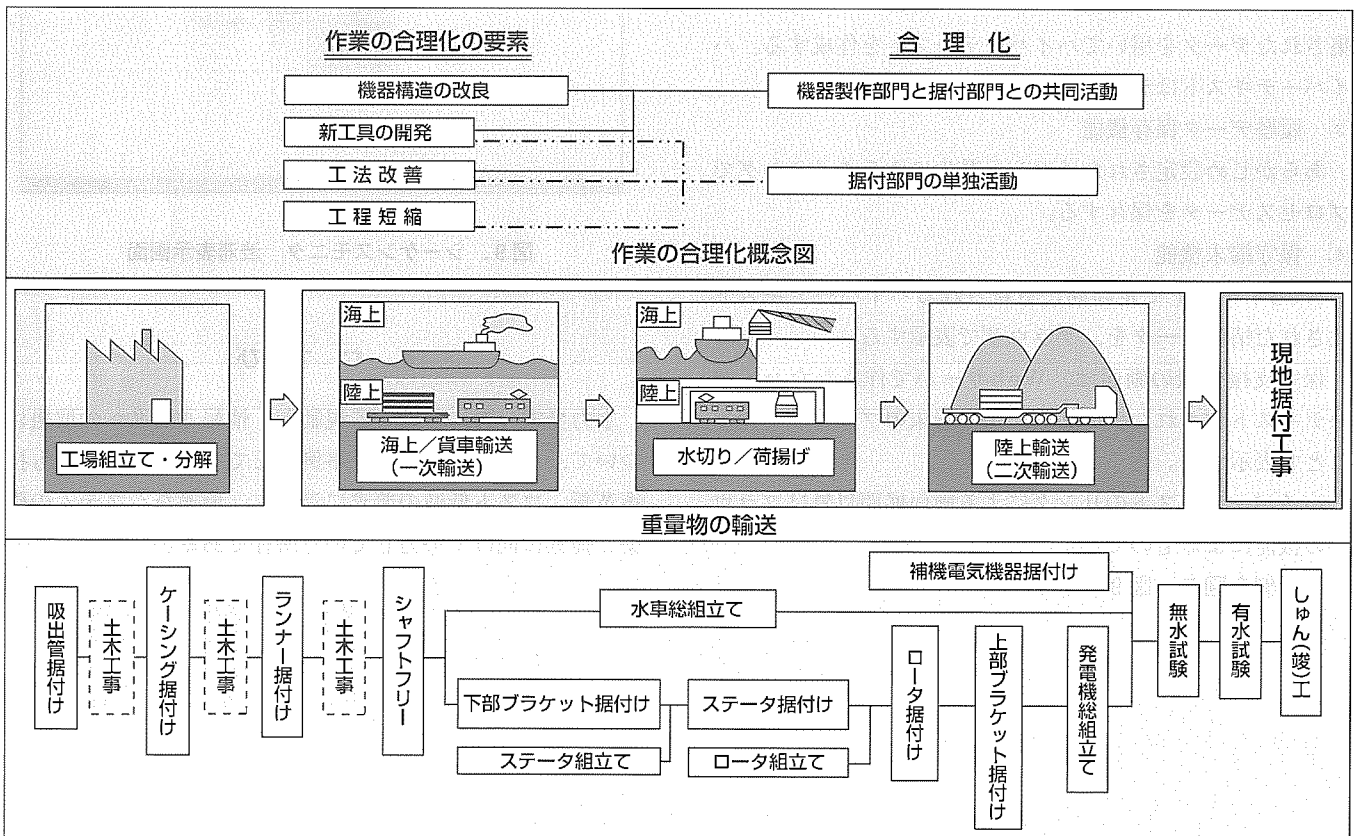
工場から発電所までの輸送は機器製作部門が担当する一次輸送と工事部門が担当する二次輸送に分かれ、輸送方法は機器の輸送分割形態で決定する。

据付工事は主に機器製作部門での工場組立ての復元作業であり、その工事物量は機器担当部門の設計に起因するウ

ェートが高い。

このような状況の中、輸送・据付工事の合理化対策として、新工具の開発、新工法の適用と機器構造の改良(設計変更)を実施してきた。前者は工事部門単独で実施してきたが、後者は機器製作部門と工事部門が共同で実施しなければならない。

本稿では、近年の水力プラント輸送・据付工事における新工具、新工法の開発・適用による工法改善の事例、及び機器製作部門と共同で実施した輸送改善の事例について述べる。



水力プラントの輸送・据付けフローチャートと作業の合理化概念図

重重量物の輸送は機器製作部門担当の一次輸送と工事部門担当の二次輸送があり、輸送方法は機器構造(機器分割)によって決定する。据付工事は、輸送された部品を現地で組み立てる作業である。したがって、作業の合理化対策には、工事部門での単独立案と機器製作部門との共同立案とがある。

1. ま え が き

水力発電所の多くは内陸の山岳地帯に建設される。発電所を構成する水車及び発電機の大型重量部品は、工場から海上又は貨車で発電所最寄りの港又は駅まで輸送し、そこでトレーラに積み替え、生活道路、数多くの橋、トンネル、山間部の狭い道路を通過しながら発電所まで陸上輸送する。

据付作業は、機器製作部門における工場組立てを現地で再現する作業であり、労働集約型の現地組立て生産である。また、水力発電所における機械組立て及び電気工事は、土木・建築工事とふくそう（輻輳）して行われるため、建設工事工程では相互の協調が要求される。

このような水力プラント特殊環境の中で、輸送・据付工事の改善は、従来、工事部門単独で行ってきた。東京電力（株）葛野川発電所及び関西電力（株）奥多々良木発電所建設工事では、輸送・据付工事の合理化のため機器製作部門と工事部門とが一体となって機器構造改良（設計変更）を実現した。

本稿では、東京電力（株）葛野川発電所及び関西電力（株）奥多々良木発電所建設工事における輸送・据付工事の合理化工法を中心に紹介する。

2. 輸 送

従来、重量物の輸送における機器分割方法は貨車又は特大トレーラの輸送限界寸法又は限界質量で機器を分割することが機器製作費用の低減化及び工事工程の最短化が期待できるため、重量物の輸送手段は機器分割数が最小化することを標準として決定してきた。しかし、特大トレーラでの輸送は道路法によって深夜輸送となり、また、通行上の安全確保のため主要交差点でのガードマンの配置、対向車・追越し車両の誘導作業等を要し大掛かりな輸送となる。

葛野川発電所建設工事の輸送では、機器製作費、輸送費、据付工事費のトータルコストが最小となる機器分割と輸送の組合せ（ベストチョイス）を機器製作部門とともに検討し実現した。

図1に発電電動機ステータ分割数とコストの相関を示す。発電電動機ステータの最適分割数の決定方法は、従来方式（機器分割最小化）における発電電動機ステータ分割数（8分割）の輸送費を基準コストとして、分割数を増やした場合の輸送費と機器製作・据付工事費増額分をシミュレーションし、輸送費・機器製作費・据付工事費のトータルコストが最小となる分割数を見付けだすことである。

葛野川発電所の発電電動機ステータの場合、最適分割数は12分割であり、30トントレーラでの輸送がベストチョイスな輸送方法となる。

表1に発電電動機重量物部品輸送方法比較（従来の機器分割最小化による輸送方法とベストチョイスによる輸送方法）を示す。従来の機器分割における輸送方法では、海上

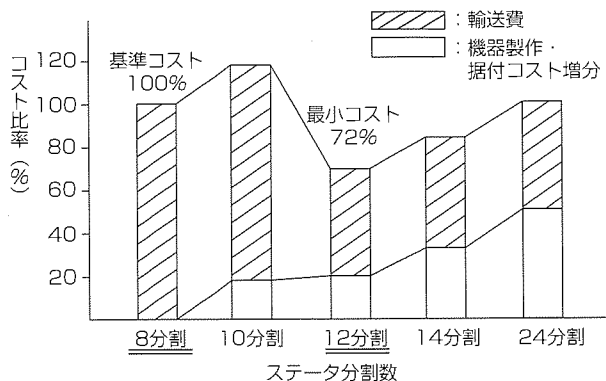


図1. 発電電動機ステータ分割数とコストの相関

表1. 発電電動機重量物部品輸送方法の比較

	従来の分割方法	ベストチョイスによる分割方法
ステータ	8分割	12分割
輸送方法	海上輸送+80トントレーラ輸送	30トントレーラ輸送
下部 ブラケット	一体	2分割
輸送方法	海上輸送+80トントレーラ輸送	30トントレーラ輸送
ロータ リム	7分割	14分割
輸送方法	海上輸送+80トントレーラ輸送	30トントレーラ輸送
発電機軸	一体	(分割不可)
輸送方法	海上輸送+80トントレーラ輸送	貨車輸送+80トントレーラ輸送
ロータ スポーク	一体	(分割不可)
輸送方法	海上輸送+80トントレーラ輸送	貨車輸送+80トントレーラ輸送

輸送と80トントレーラ輸送を併用するため、港での荷揚げ（水切り）費用及び特大（80トン）トレーラ輸送費用が必要とされていた。しかし、ベストチョイスによる輸送方法では、工場から発電所まで直接輸送可能となる30トントレーラの採用を主眼とし、発電電動機設計部門の協力を得て機器構造の変更を行い、発電電動機のステータ、下部ブラケット及びロータリムの機器分割数の増加を実現化した。

機器分割数の増加によって機器製作費及び現地据付費が増加したが、通常トレーラの採用による輸送費の大幅減少によってプラント全体でのコストダウンを達成した。

3. 据 付 け

水力発電所の水車及び発電機等の主要工事は、工場から輸送された機器の部品を現地で再現する機械組立作業であり、高度な据付精度を要する作業である。また、建設工事を取り巻く環境は、熟練作業員の減少及び作業員の高齢化による施工品質及び作業効率の低下が懸念されている。このような環境の中での近年の水力プラントにおける施工品質及び作業効率の向上を目的として新工具・新工法を採用

した合理化工法の内容を以下に紹介する。

3.1 ダブテールキー打ち込み機の開発と適用

発電機ロータ組立作業にポールをロータリムに接続固定する作業がある。ポールとロータリムの接続固定方法は、ロータリムの溝にポールを挿入し、溝のすき(隙)間にライナを入れ、ダブテールキーを打ち込んで圧縮応力を加えて固定する。

この作業の従来工法は、図2に示すとおり、高所で16ポンドハンマーを用いダブテールキーを人力で打ち込む作業を行っており、作業者の熟練を要すると同時に“危険”“きつい”作業の一つであった。

新工法としてダブテールキー打ち込み装置を機器製作部門と共同開発し、機械化による安全化かつ熟練作業を不要とした品質の安定化等の作業改善を行い実証した。

ダブテールキー打ち込み装置の外形図と仕様を図3に示す。ダブテールキーの主要構造は、支柱、アーム、ヘッド、ハンマーで構成している。支柱はロータスポークにボルトで固定し、アームは円周方向にダブテールキーを打ち込むため360°回転する構造としている。アームの昇降及び伸縮は電動機を使用し自動化した構造とした。

ダブテールキーを打ち込むハンマーは、電磁石で吸着・上昇させて落下高さを設定し、自然落下させることによ

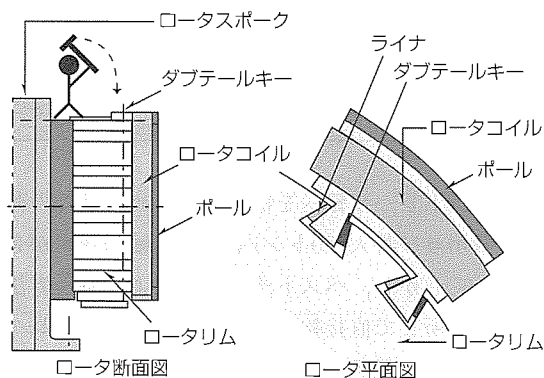


図2. ダブテールキー打ち込み工法(従来)

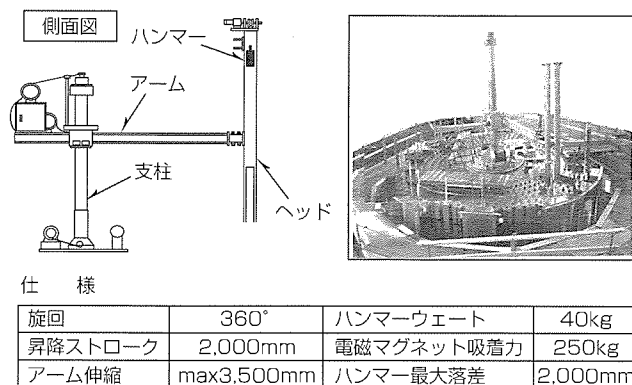


図3. ダブテールキー打ち込み装置の外形図と仕様

て人力による打ち込み作業と同様な効果を得ている。

3.2 ブロック化工法の採用

大容量発電機の回転部の荷重を支える基礎部の一般的な構造を図4に示す。回転部のすべての荷重はスラスト軸受で支えており、スラスト軸受は下部ブラケットを通じて基礎に固定している。したがって、下部ブラケットのレベル精度は発電機の施工品質上重要な位置付けにある。

従来の下部ブラケットの施工方法は、ブラケットベースの設定・調整・レベル確認を実施後、下部ブラケットをピット内につ(吊)り込み据付け、調整、レベル確認を実施するステップバイステップ工法を採用していた。

従来工法での作業効率の悪いピット内での作業の省力化を図るため、ブラケットベースと下部ブラケットを組立室(輸送されてきた部品の仮置きと組立て場所)で一体化(ブロック化)し、ブロック化した下部ブラケットをピット内に吊り込み据付け・調整し、最も据付精度を要求される下部ブラケットのスラスト軸受部が正規の位置(水平、垂直方向)であることを最終確認するブロック化工法を開発し実証した。

3.3 その他の合理化工法の適用

近年の新設水力プラント工事だけでなく既設改修/更新工事を含めて新工具を採用した合理化工法を紹介する。

(1) 盤起立転倒搬送装置

既設改修工事は、新設工事と異なる環境条件(活線/停電作業、既設設備との協調)で工事を行う。盤起立転倒搬送装置は、発電所における配電盤改修工事に改良開発した新装置である。

発電所によっては、制御盤の搬入時、搬入通路及び各部屋の扉寸法の関係上、制御盤を倒して搬送し、配電盤室で制御盤を起立させてから所定の位置に据え付ける工法を採用する必要がある。この作業を少人数及び短時間での作業を行うため、搬送式2トン油圧門型リフターに盤を取り付け、盤の下部に盤支持台車を取り付けることによって盤の起立・転倒・搬送の動作が容易に行えるように改良開発した。盤の搬送は盤を斜めにした状態で油圧門型リフターと

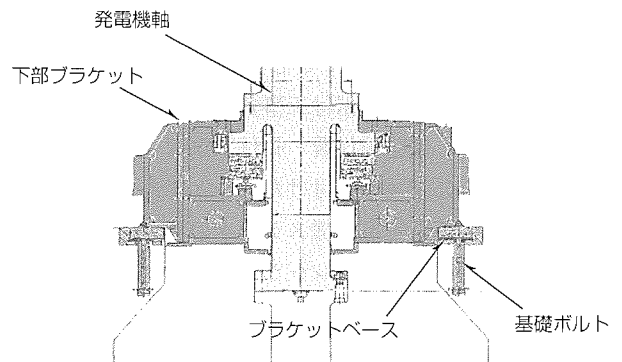


図4. 下部ブラケット組立断面図

ともに移動させ、盤の起立・転倒は門型リフターの両サイドの支柱を油圧によって上昇・下降することで簡単に行える。

図5に装置の仕様と作業例を示す。

(2) ツータッチキャリア

従来、盤の横持ち運搬及びオンベース作業は、盤をハンドリフターに載せて搬送し、盤の4隅にジャッキを入れてジャッキダウンすることで盤をオンベースしていた。ハンドリフターの爪幅は盤幅に比べて狭いため盤の搬送は不安定となり、盤の両サイドを作業者がサポートしながら搬送し、かつ、盤下降時のジャッキダウンに多くの人手と時間を必要としていた。

当社の開発した盤搬送用ツータッチキャリアは、盤の4隅にツータッチキャリアをセットし、質量2トンまでの盤を人力によって簡単に床面から持ち上げてかつ安定した姿勢で安全に搬送し、所定のベース上にオンベースする装置である。

ツータッチキャリアの構造と作業例を図6に示す。ツータッチキャリアの上部にある五角形のカムを2回の動作で操作バーを使い回転させることにより、この原理によって盤を簡単に人力で床面から75mm持ち上げることができる。ツータッチキャリアの開発によって盤の搬送からオンベースまで一貫した作業が安全かつ容易にでき、作業の省力化が図れた。

(3) アンカー穴あけ装置

吸い出し管支持架台をコンクリート基礎に固定する後施工アンカー(M24及びM20ボルト)用穴あけ装置を開発した。

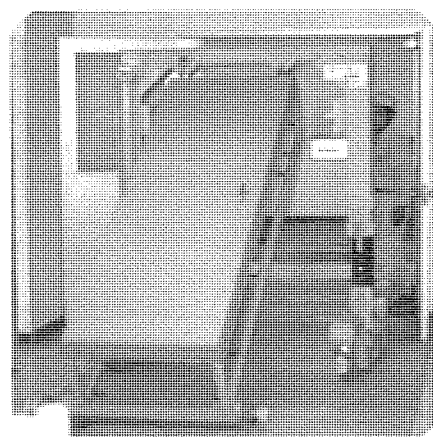
従来は、作業者がハンドドリルをコンクリートに当てて穴あけをするため、体重をハンドドリルに乗せコンクリートの粉じん(塵)を浴びながら行う作業であった。アンカー穴あけ装置は、図7に示すように、装置を所定の位置にセットし、ドリルをばね力によってコンクリートに押し付けながら穴をあける装置である。作業者は位置決め後にスイッチを押すだけで自動的に設定深さまで穴あけでき、楽に多数の穴あけ作業が可能となった。

4. む す び

作業員の高齢化及び熟練作業員減少の問題を抱える水力プラント建設工事の中で、機器製作部門と工事部門が一体となって機器構造の改良に取り組んだ事例、及び機械化による作業の省力化を中心とした工法改善の事例を紹介した。今後の水力プラント工事では、工程短縮と作業の省力化の面から見て機械組立作業に対する合理化が更に求められる状況にあり、機器の設計段階から機器製作部門と工事部門の連帯が一層必要となる。

今後も、自部門だけでなく機器製作部門との共同活動を展開するとともに、電気品据付け及び機械組立作業におけ

る新工具の開発、工法改善を継続する所存である。



揚程 1,500mm
搬送質量 2,000kg

図5. 盤起立転倒搬送装置



積載質量 2,000kg/セット
揚程 75mm

図6. ツータッチキャリア



図7. アンカー穴あけ装置

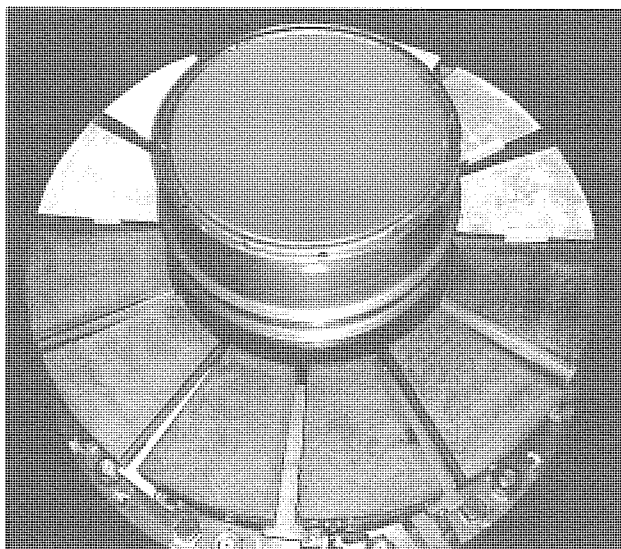
既設水力発電所への最新技術の応用

要 旨

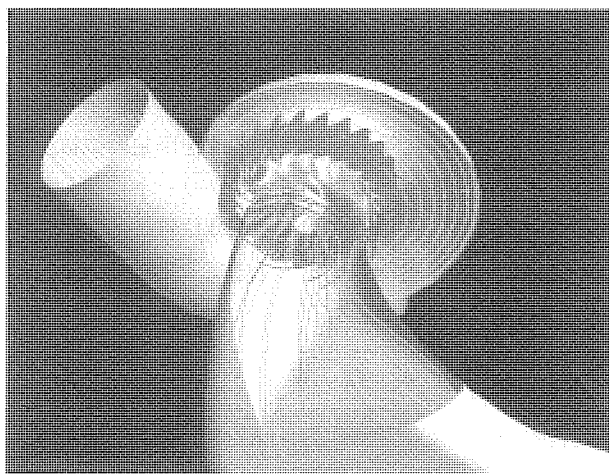
近年、電力会社のメンテナンス費用は削減の方向に進んでいる。長寿命化等によるオーバーホールインターバルの延長、改修工事の期間の短縮、補機の簡素化などコストダウンに直結するニーズが強く求められており、新技術の提供によってニーズにこたえる活動を行っている。水車発電機の予防保全に係る新技術のうち“樹脂軸受”“スラストスプリング”“リップスプリング”について紹介する。樹脂軸受については発電機損失の改善と保守性の向上、スラストスプリングについては荷重調整作業の簡素化、リップスプリングは点検インターバルの延長というメリットがあり、

これらの新技術の適用は今後の水力発電プラントの効率的なメンテナンスに有効であるといえる。

一方、水車におけるコストダウンについては機械自体の高速化によるコンパクト化に継続して取り組んでいるが、更なる経済性・保守性の追求においては、本体機器の構造の簡素化、給水・給油レス化や新流水部形状を適用した高性能水車の取組などがなされている。ここでは、これら新しい取組のうち、“電動サーボモータの適用範囲の拡大”“セラミックス軸封装置”“新コンセプトランナ”について紹介する。



30,000kVA級水車発電機用樹脂製スラスト軸受



フランス水車一体流動解析結果(圧力分布, 流線)

水車発電機、水車に適用される新技術

30,000kVA級水車発電機用樹脂製スラスト軸受、及びCFD(Computational Fluid Dynamics)による一体流動解析例を示す。

1. ま え が き

近年、電力会社のメンテナンス費用削減方針により、水車・水車発電機器においてもオーバーホールのインタバルが長くなりつつある。それに伴い、これら機器に使用される部品についてはより長寿命化が望まれるようになった。また一方では、オーバーホールの期間短縮や保守性の向上も強く望まれており、組立分解作業や補機の簡素化につながる技術も必要となっている。以上のようなニーズにこたえる技術として、三菱電機(以下、当社)は数多くの新技術を開発してきた。本稿では、樹脂軸受を始め水車発電機の長寿命化や作業簡素化に有効な新技術について、水車については補機の簡素化と水車の高性能化について紹介する。

2. 水車発電機における新技術の予防保全への適用

2.1 樹脂軸受

これまで水車発電機の軸受しゅう(摺)動面材料としてはホワイトメタルが適用されてきたが、当社では、それに代わる材料として樹脂の適用を開始している。樹脂としてはPEEK(ポリエーテルエーテルケトン)を使用しており、その特長は次のとおりである。

- 耐熱性に優れている。
- 機械的強度に優れている。
- 耐衝撃性、強じん(韌)性及び耐疲労性に優れている。
- 耐薬品性、耐加水分解性に優れている。濃硫酸以外のものに侵されない。
- 耐摩耗性に優れている。

水車発電機の予防保全において、このような特長を持つ樹脂軸受を適用することによって次のメリットが創出される。

(1) 軸受信頼性の向上

樹脂軸受はクリープ量がホワイトメタルの1/100~1/1,000と優れている。また、高温、高面圧下の過酷な条件でもホワイトメタルのような焼付きを起こすこともない非常に優れた機械強度を持っており、軸受の信頼性向上が図れる(図1, 表1)。

(2) 保守性の向上

ホワイトメタルは、起動停止の繰り返しによる熱変形の

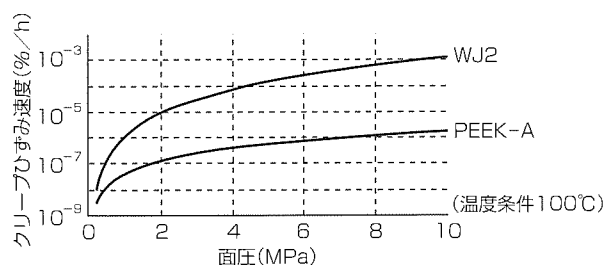


図1. クリープひずみ速度

繰り返しや経年劣化によって経年とともに接合面のはく(剥)離が発生し、定期的にメタルの盛り変えが必要である。これに対し、樹脂軸受は、熱変形がホワイトメタルに比べて小さく、また起動停止による摩耗もホワイトメタルの1/100~1/1,000と小さいため、メンテナンス期間を従来よりも延長することが可能となる。また、樹脂軸受は、ホワイトメタルに比べて摩擦抵抗が低く摩耗も少ないことから、発電機起動停止時にスラスト軸受に圧油を供給するオイルリフト装置の省略が可能となり、油漏れの一大要因である圧油系統のメンテナンスが不要となる(図2)。

(3) 軸受損失の低減

樹脂軸受は、高温時の機械強度及び耐焼付き性能に優れるため、軸受を高面圧化して軸受損失を低減することが可能である。水車発電機予防保全においては、スラスト軸受を高面圧化して発電機軸のスラストカラー部を小型化することによってガイド軸受摺動部周速と回転子ランナ周速の低減が可能となり、軸受損失の低減が図れる。軸受損失が低減されることにより、発電機空冷軸受化の適用範囲を30MVA程度まで引き上げることが可能となる(図3)。

表1. 高温、高面圧下の焼付き有無試験結果

	温度条件	面圧	焼付き
PEEK-A	100℃	30MPa	なし
	120℃	30MPa	なし
WJ2	100℃	23~28MPa	あり
	120℃	15~20MPa	あり

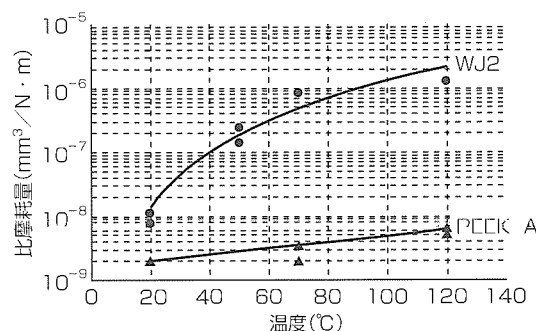


図2. 軸受材料の摩耗量

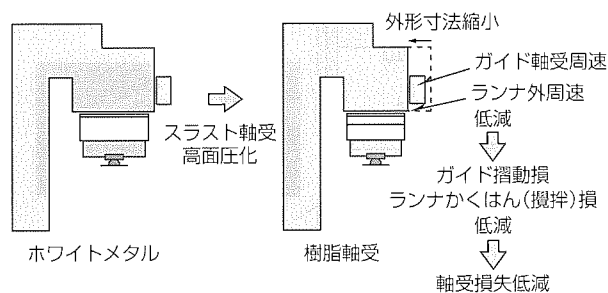


図3. 軸受損失低減説明図

(4) 軸絶縁の廃止

当社が採用している樹脂軸受(PEEK)のうちカーボンを含まないPEEK-Bタイプは優れた電気絶縁性を持っている。この樹脂をスラスト軸受とガイド軸受に使用することにより、従来オーバーホールごとに更新が必要であった軸絶縁を廃止することができる。

2.2 スラストスプリング化

従来の調整ボルト支持方式におけるスラスト軸受の荷重分担調整作業は熟練技術者個人の経験と技能・技量に負うところが大きく、近年の熟練技術者の減少と技術習得には長い経験が必要とされることから、技術の伝承が困難となることが懸念される。これらの問題を解決するため、自身のばね調整機能によって荷重調整を不要にし製作精度を管理することにより、荷重分担のばらつきを精度良く管理するスラストスプリング支持方式が開発された(図4)。これまでに、予防保全として調整ボルト方式からスラストスプリング化への変更を大容量発電電動機(300MVAクラス)から小容量水車発電機(20MVAクラス)まで適用済みである。また、10MVA以下の小容量機への適用可能な小型スラストスプリングの開発も完了している。

2.3 固定子コイル用ウェッジの緩み対策

固定子コイルは、ウェッジでコアスロットに強固に固定されている。固定子コイル(ウェッジ)は長期間の運転によるヒートサイクルや電磁振動の影響で緩みが発生するため、オーバーホールごとにウェッジの打ち替え作業を実施している。近年のオーバーホールピッチ延長のニーズにこたえるために、水車発電機においても機械的特性、耐熱性に優れた絶縁物の板ばね(リプルスプリング)をウェッジでたわ(撓)ませ、ウェッジの緩みを吸収し押し付け力を保持する方法の適用を開始した(図5、図6)。ステータコイルとコアの更新に当たっては、この方式を標準として採用している。

3. 水車における新技術の予防保全への適用

3.1 電動サーボモータの適用範囲の拡大

ガイドベーン操作に電動サーボモータが使用されだし

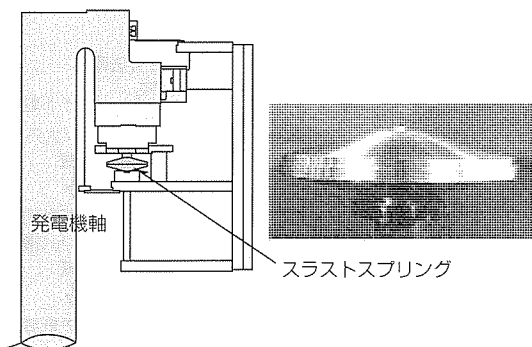


図4. スラストスプリング組立図

てから久しいが、最近では、カプラン水車のランナベーン操作、入口弁操作にも使用され始め、大容量化が指向されている。従来の電動サーボモータにはブラシレス同期電動機が使用されていたが、最近では、誘導電動機でのベクトル制御方式が採用され、これが大容量化を可能にした。ガイドベーン操作としての電動サーボモータの適用範囲の例を図7に示す。

当社では、この電動サーボモータの適用される機種種の拡大を図るため、小容量デリア水車の適用に取り組んだ。当社のデリア型水車のランナベーン操作は従来からロータリ型の油圧サーボモータで行っているが、これを電動化することによって圧油装置の省略、回転部質量の軽減が期待できる。図8に操作機構の概略を示す。

3.2 セラミックス軸封装置

軸封装置のタイプとしてはグラウンド式と機械式に大別されるが、それら専用の給水を省略することは補機の簡素化による保守性の向上、ランニングコストの低減等につなが

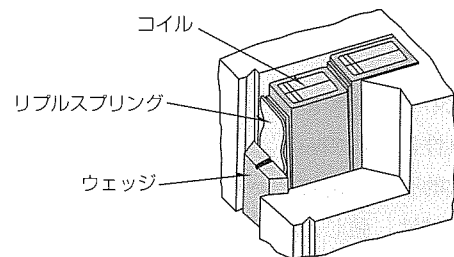


図5. リプルスプリング説明図

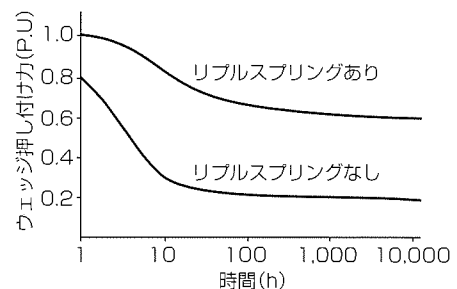


図6. ウェッジ押し付け力の経時変化

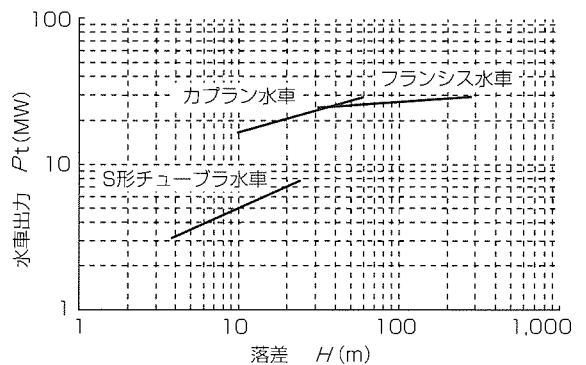


図7. 電動サーボモータの適用範囲例

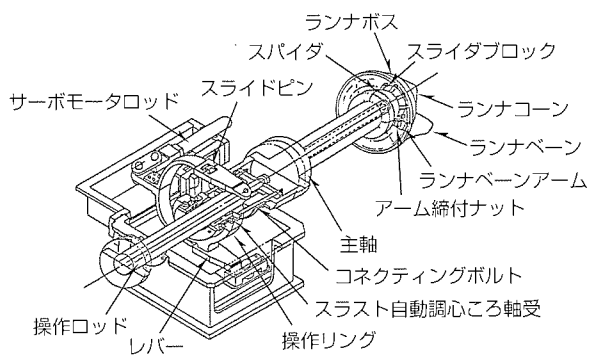


図8. 操作機構の概略

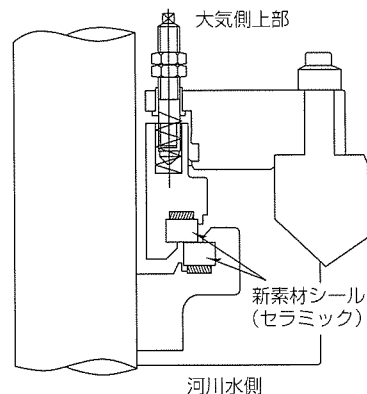


図9. セラミック軸封装置の外形

る。当社では早くからこの開発に取り組み、セラミックスソリッドのシール材を使用したもので現在では口径900mm、周速25m/sまで対応可能となっている。図9に外形図を示すが、漏水量の極小化を図っている。また、セラミックスは本来非常にもろ(脆)い材質であるため、衝撃力の緩和向上を図っている。

3.3 新コンセプトランナ

水車の性能改善は、流水部の各部分で発生する各種の損失をいかに低減できるかによる。運転状態によって多少異なるが、損失の大半はランナ及び吸い出し管内で発生している。最近ではコンピュータによる解析技術が発達しCFDなどの内部流動解析によって流水部の各部分詳細にわたってどのような流れでどのような損失が発生しているかも把握できるようになってきたため、この技術は水車の開発と性能向上には不可欠な手段となっている。

フランス水車においては水の流れがランナ及び吸い出し管内で断面的に見て90°変更するため、他の流水部よりも流動状況が複雑となっている。図10に、ランナ内における二次流れの挙動のCFD解析結果と実験した結果の比較を示す。主流とは異なる流れ同士が干渉しているのが分かる。

図11には、このような流れによる損失をランナベーンにおける負荷分布をコントロールすることによって軽減した新コンセプトのランナと従来形状との比較を、また図12には、模型試験によるこれらの比較を示す。流量全域にわたって効率の改善が見られ、実機では取替え工事で数プラントに適用計画中である。

4. む す び

水力プラントにおいても予防保全工事における省力化、工事期間短縮、オーバーホールインターバルの延長などのニ

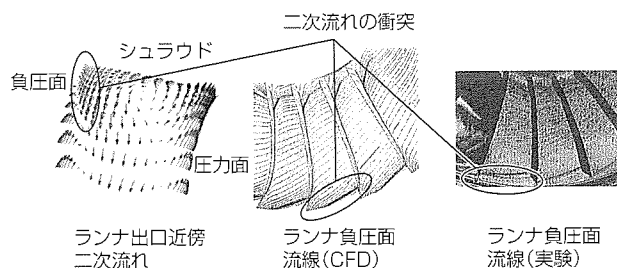


図10. ランナ内二次流れ挙動

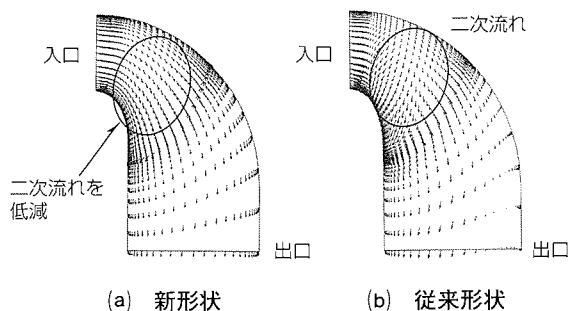


図11. 子午面内二次流れ比較

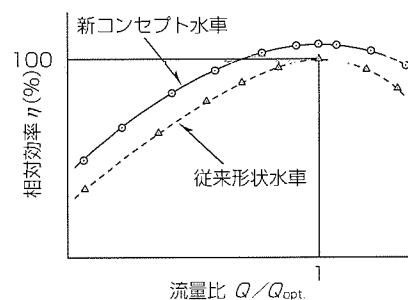


図12. 新コンセプト設計による効率改善

ーズは高まるばかりである。このニーズにこたえつつ、今後も信頼性を高める技術の開発を展開していく所存である。

水力プラントの総合解析・検証システム

要 旨

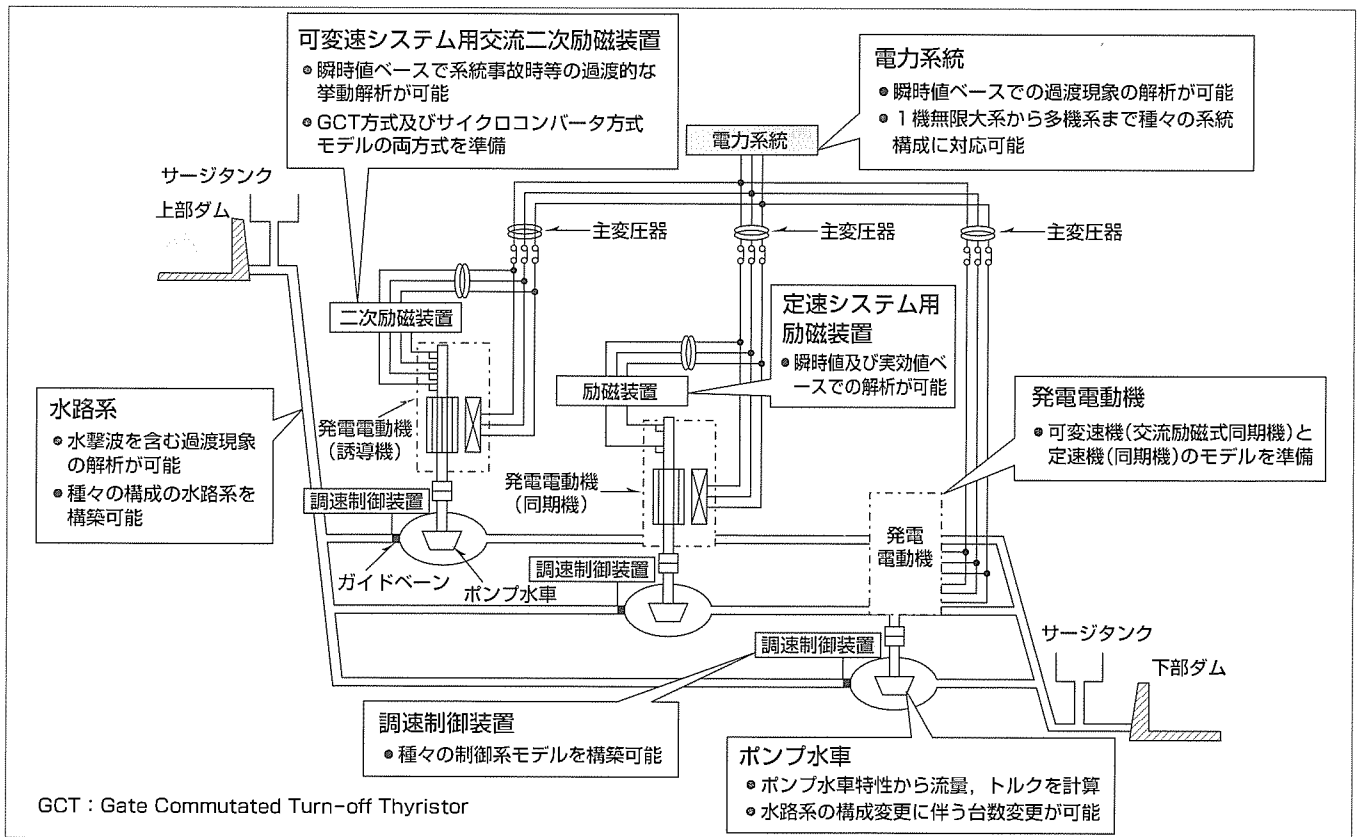
水力プラントの解析を行う場合、電気系と機械系の応答時間の違いなどから、従来、解析目的により、例えば①発電電動機、励磁装置の過渡現象解析時には、ポンプ水車及び水路系モデルを簡略化する、②ポンプ水車及び水路系の過渡現象解析時には、発電電動機、励磁装置モデルを簡略化する、のようにモデルを部分的に簡略化することが多かった。

しかし、このような解析手法では、①可変速揚水発電システムの制御系を開発する場合、ポンプ水車ガバナ制御系と励磁制御系の相互をうまく協調させた制御方式を考える必要がある、②ポンプ水車1台の運転変動が電力系統に及ぼす影響を解析する必要がある、などの課題に対処できない。

そこで、このような課題に対処し、かつ解析精度向上のため、リアルタイムで実行可能なポンプ水車及び水路系の詳細モデルを新たに開発し、ポンプ水車、水路系、及び発電電動機、励磁装置、電力系統すべてを詳細に模擬する瞬時値ベース解析プログラム、リアルタイム電力系統シミュレータ、及び実回転機シミュレータを開発した。

この総合解析・検証システムにより、水力プラントにおける電気系、機械系個々の詳細な解析、及び相互に及ぼす影響の解析が可能になったばかりでなく、実制御装置、実保護装置の仕様設計、検証、調整が可能になったため、試験調整の効率化と製品品質の向上などが期待できる。

本稿では、この総合解析・検証システムの構成、特長、及び用途について述べる。



水力プラント総合解析システムの構築例

1条3分岐構成のプラントの構成例で、容易に任意の構成のプラントの構築が可能である。

1. ま え が き

従来、水力プラントの解析を行う場合、①ポンプ水車などの機械系は発電電動機などの電気系に比べて応答が遅いため、解析刻み時間が異なる、②電気系の挙動解析は非常に短時間(数百ミリ秒～数秒)であるのに対し、機械系の挙動解析は長時間(数秒～数百秒)であるなどの理由で、以下に示すように、解析目的に応じてモデルを部分的に簡略化していた。

- (1) 負荷／入力遮断などの挙動解析によって水圧鉄管、ポンプ水車、ポンプ水車がバナ系の設計などを行う場合には、発電電動機、励磁装置、電力系統を簡略化する。
- (2) 電力系統を含む事故などの挙動解析によって発電電動機、励磁装置の保護、制御方式の設計などを行う場合には、ポンプ水車、水路系、電力系統を簡略化する。

ところが、通常一つの水路系に複数のポンプ水車-発電電動機が設置されているため、1台のポンプ水車-発電電動機の運転状態に変動が生じた場合、その影響が水路系を経由して他のポンプ水車-発電電動機さらには電力系統にまで波及する可能性があり、その影響の解析が必要であるが、従来の解析手法では対処できない。

そこで、水撃波の模擬が可能な水路系のリアルタイム詳細モデル、ポンプ水車特性から精度良く流量やトルクを計算するポンプ水車モデルを新たに開発し、ポンプ水車、水路系、及び発電電動機、励磁装置、電力系統すべてを詳細に模擬する瞬時値ベース解析プログラム、リアルタイム電力系統シミュレータ、及び実回転機シミュレータという水力プラント総合解析・検証システムを開発した。

2. 総合解析・検証システムの構成、特長、及び用途

(1) 瞬時値ベース解析プログラム

各部すべてに詳細モデルを用いた瞬時値ベース解析プログラムは、EWS単体で動作する瞬時値ベースの過渡現象解析プログラムEMTDC(Electromagnetic Transients Program for DC。カナダのManitoba HVDC Research Centre製)上に構築したものである。図1にソフトウェア構成を示す。

発電電動機・電力系統システムには、GCTサイリスタ素子を模擬した詳細励磁装置モデル、アレスタやサイリスタスイッチなどを模擬した詳細保護回路モデルなどが用いられている。また、モデル構成の組替えを容易に行うことができ、様々な構成の水力プラントのモデルがすぐに構築可能である。

このシステムでは、①水力プラントの通常運転時、及び異常時、事故時の詳細な挙動解析、②制御方式、保護方式の開発と検証、③機器の仕様設計などを行うことができる。

(2) リアルタイム電力系統シミュレータ

リアルタイム電力系統シミュレータは、リアルタイムで実行可能な多機系検証設備である。そのハードウェア構成を図2に示す。

発電電動機は詳細模擬したデジタルモデルで、実機相当の定数設定が可能である(同期発電電動機17台、交流励磁発電電動機2台まで構築可能)。電力系統や変圧器などはアナログ機器で模擬され、直流送電系統・機器、FACTS(Flexible AC Transmission System)機器などのモデルも備え、最新技術を含む系統の模擬が可能である。また、ポンプ水車及び水路系は瞬時値ベース解析プログラムと同じデジタルモデルを用いている。制御系は様々な制御方式と保護方式を取り入れた実装置である。

このシステムにより、①水力プラントの通常運転時、及び異常時、事故時の詳細な挙動解析、②制御方式、保護方式の開発と検証、③機器の仕様設計などを行うことができるだけでなく、④実制御装置、実保護装置の試験調整も実行可能である。

(3) 実回転機によるシミュレータ

実回転機シミュレータは、可変速揚水発電システムの検証用として開発した検証設備である。そのハードウェア構成を図3に示す。

このシステムは、①可変速発電電動機は大容量機相当のリアクタンスを持つ実回転機、②実機相当の変換器及び

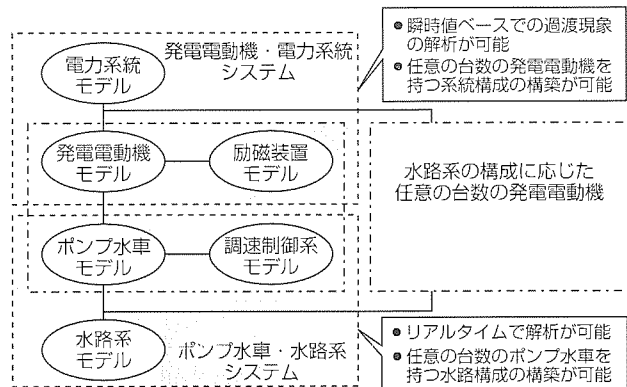


図1. 瞬時値ベース解析プログラムのソフトウェア構成

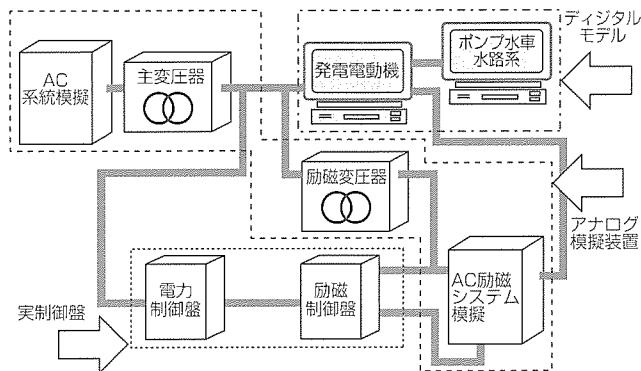


図2. リアルタイム電力系統シミュレータの構成

GCT素子相当の特性を持つ励磁装置，③実制御装置，で構成されるため，デジタル模擬では発生しない可能性のある実回転機特有の過渡現象を模擬することが可能である。

このシステムにより，①可変速揚水発電システムの通常運転時，及び異常時，事故時の挙動解析，②実制御装置，実保護装置の検証試験を行うことができる。

3. 解析例

瞬時値ベース解析プログラム，リアルタイム電力シミュレータ，実回転機シミュレータともに開発が完了し，実プラントデータとの比較，各システムの解析結果の相互比較により，各システム相互の整合性は検証済みである。

以下に，解析例として，リアルタイム電力システムシミュレータによる水力プラントの試験例を示す。

(1) 試験モデル

試験に用いたモデルの構成を図4に示す。

- 水車・水路系：1条2分岐構成
- 発電電動機：300MVA級可変速機2台(2台とも同一仕様)
- 励磁装置：自励(GCT)方式
- 電力系統：1機無限大系(2回線構成)

(2) 試験条件

発電運転時，発電機至近端4LG(1回線3相地絡+1回線1相地絡)事故発生，4サイクル後保護動作によって事

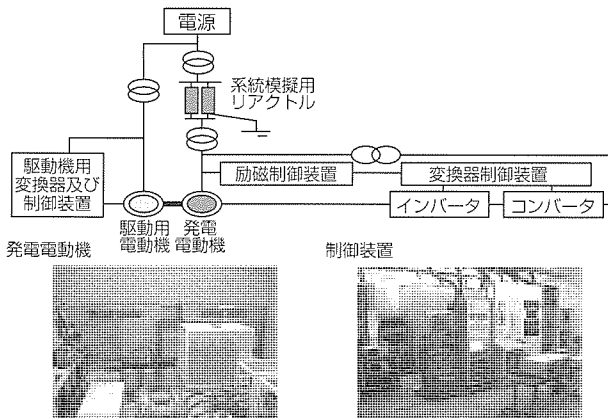


図3. 実回転機シミュレータの構成

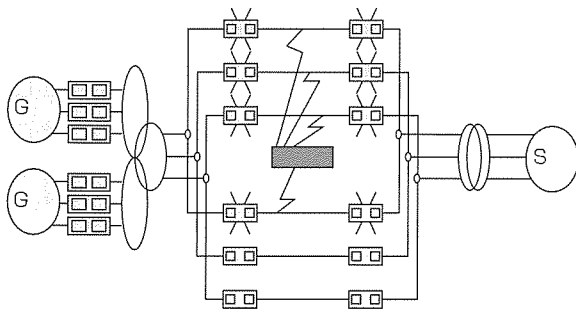


図4. 試験に用いたモデルの構成

故が除去され，更に1秒後に遮断器が再閉路する。

(3) 試験結果

図5に発電機の有効電力と無効電力，図6に電力系統の各相の電流瞬時値，図7にインバータの各相の電流，図8にポンプ水車機械トルク，ガイドベーン開度及びケーシング水圧の試験結果を示す。

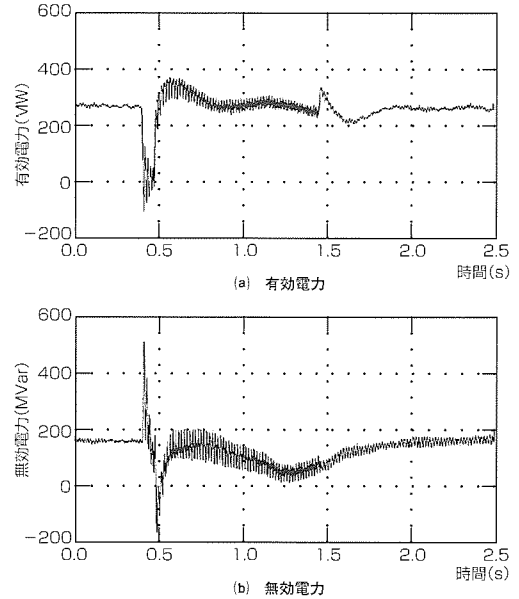


図5. 発電機の有効電力と無効電力

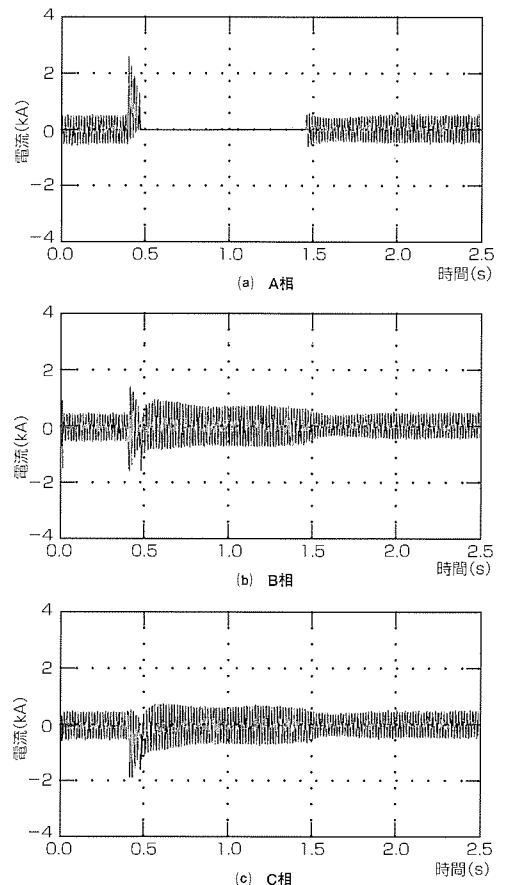


図6. 系統電流瞬時値

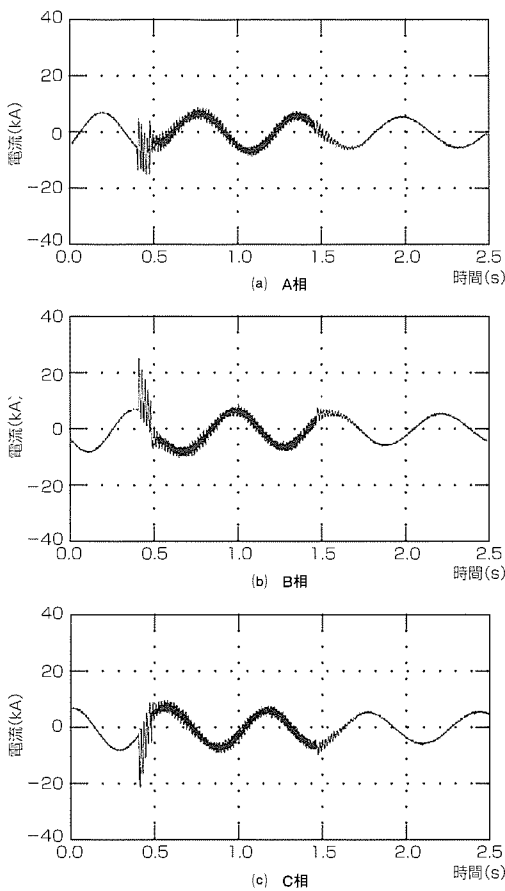


図7. インバータ電流

このように、総合解析・検証システムでは、発電電動機、電力系統などの電気系からポンプ水車、水路系などの機械系までの各部の状態変化を把握することができる。

4. むすび

水力プラントにおける電気系と機械系相互に及ぼす影響の解析及び解析精度向上のため、リアルタイムで実行可能なポンプ水車及び水路系の詳細モデルを新たに開発し、ポンプ水車、水路系、及び発電電動機、励磁装置、電力系統すべて詳細に模擬する瞬時値ベース解析プログラム、リアルタイム電力系統シミュレータ、及び実回転機シミュレータの3種類の水力プラント総合解析・検証システムを開発した。

このシステムでは、①容易にプラントの構築、組替えが可能なポンプ水車及び水路系モデル、②様々な方式の励磁装置を備えた発電電動機及び電力系統モデル、③様々な方式を取り入れた制御・保護装置モデルを用いているため、①様々な構成の電力系統の高精度な瞬時値解析、②水路系における水撃波の模擬などのような機械系の詳細解析、③高調波解析などのような電気系の詳細解析などが可能となった。

この水力プラント総合解析・検証システムは、

- ガバナ系と励磁系の協調制御方式
- 励磁装置の保護と制御方式

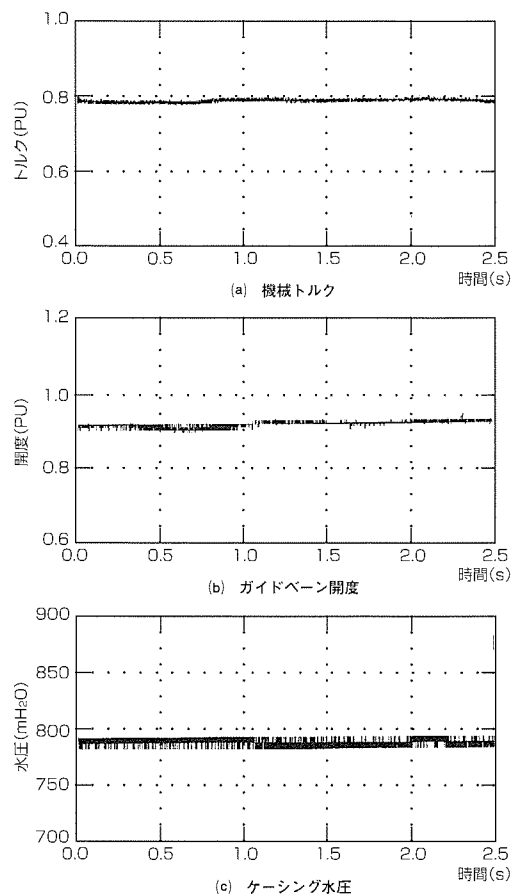


図8. 機械トルク、ガイドベーン開度及びケーシング水圧

- ポンプ水車の保護方式
- 系統安定化制御方式

などの高度な制御方式の研究、開発、及び設備の仕様設計、検証など、幅広い用途での利用が期待できる。

また、リアルタイム電力シミュレータと実回転機シミュレータでは、実制御装置、実保護装置の試験調整もできるので、水力プラントの設計及び試験調整の効率向上、設備の品質向上に寄与できる。

参考文献

- (1) 森 健志, 寺下尚孝, 三宮靖典, 郡 武亀: 揚水発電プラントにおける水車・水路系の実時間シミュレーション, 日本機械学会第73期総会講演会論文集 (1996-4)
- (2) Mori, T., Shimomura, M., Sannomiya, Y.: Development of a Real-time Simulation System for an Adjustable Speed pumped Storage Power Plant, Modelling, Testing & Monitoring for Hydro Powerplants-III Proceedings, 593~601 (1998-10)
- (3) ジョン・パーマキアン, 小堀 威: 水撃解析法, コロナ社 (1969)
- (4) 山田嘉昭, 横内康人: 有限要素法による弾塑性解析プログラミング, 培風館 (1981-3)

水系制御システム

大川雅博* 長谷川誠一**
 監崎 章* 内林 輝**
 佐藤裕二*

要 旨

近年のデジタル技術、通信技術の進歩により、プラントコントローラの監視制御機能は多岐にわたる応用が可能となってきている。特に、CPUの高速化とメモリ容量増大により、発電機1台のみならず大規模システムの監視制御を1台のコントローラで実現することも可能となってきた。

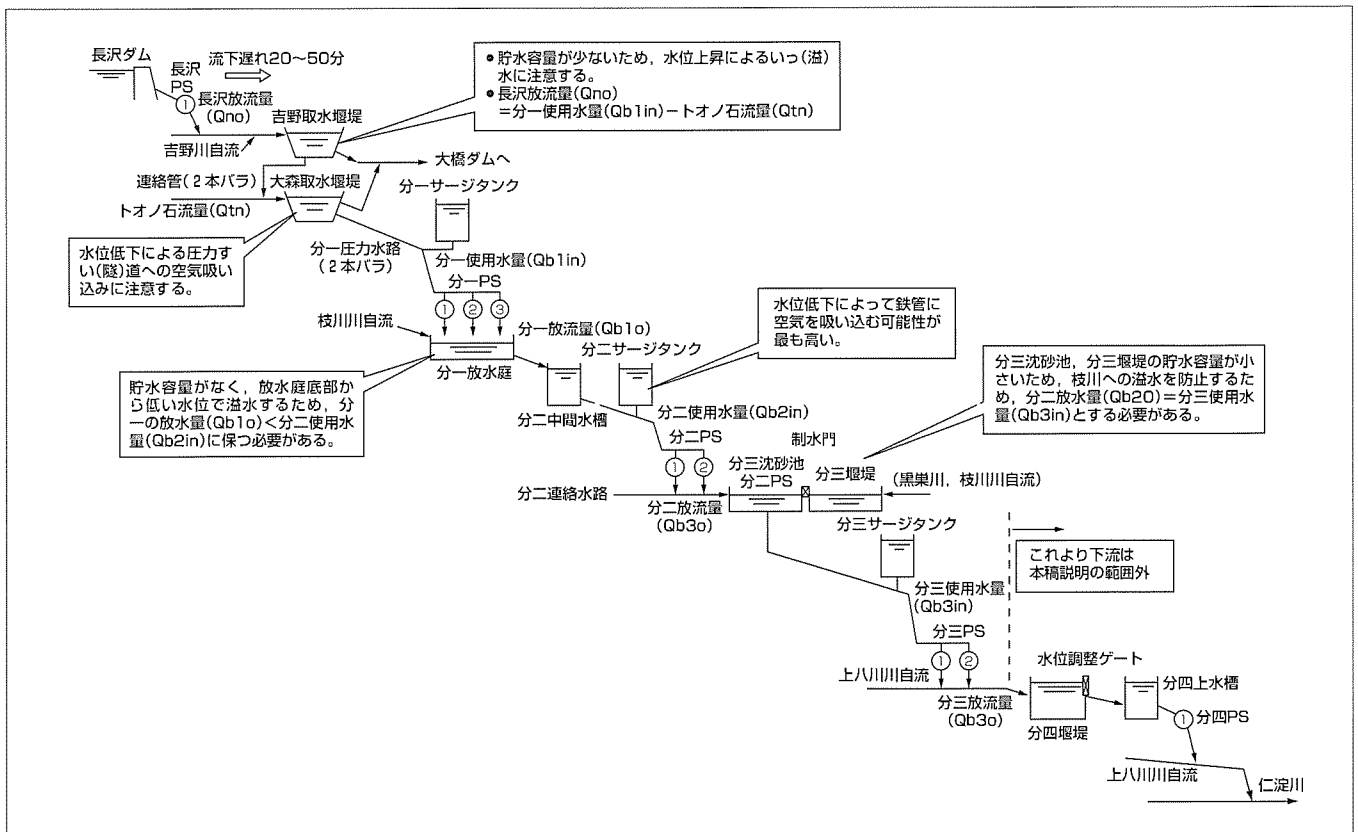
本稿では、上記プラントコントローラの適用事例として、四国電力(株)納め分水系ALR(Automatic Load Regulator)装置のシステム更新を実施したので、その概要について紹介する。

既設システムは、各発電所(4発電所)にプラントコントローラを配置し、各発電所間はCDT(Cyclic Digital data Transmission)装置によって直近発電所間で上流から下流への一方方向のデータ送信を実施し、ALRシステムとして

も簡素な制御しか行っていなかった。

そのため、起動時の水位条件によっては急激な出力変化や無負荷運転等を強いられ、主機に対しても好ましくなく、一部運転員の手動操作を必要としていた。また、電源規模が変化し、分水系に求められる運用条件が電力需給バランス調整から水量による一定のパターン運転へと変化してきたため、現状の制御機能にない運転モードも必要となっていた。

今回、既設ALRを最新のプラントコントローラを採用したALRに更新することで上記問題点を改善したが、納入に当たってシステム検討、機能検討、及び水路系モデルの製作、シミュレーション試験を実施し、現地での実機確認試験が完了したので、その内容について以下に述べる。



分水系水路モデル

上記水路系モデルをEWSで構築し、コントローラ側のプログラムの妥当性を検証した。

1. ま え が き

近年、水力発電の分野においても複数のデジタル装置をネットワークで接続したデジタル制御システムが採用されており、特に複雑な制御が要求される揚水発電所などに納入されている。一般的にプラントコントローラは、数値制御、シーケンス制御が共通のハードウェアで実現できることや、リレーシーケンス制御装置と比較して高度な制御が高い信頼性を持って行えるなど数多くの長所がある。またコンピュータシステムとの比較においても、プログラムがグラフィックシンボルなどの簡易な言語で記述されるため、制御機能の可読性に優れ機能変更が比較的簡便に行える長所がある。

本稿では、そのプラントコントローラの長所を生かした一例として、四国電力(株)分水系4発電所を一貫制御するために納入したALRシステムについて紹介する。

2. 分水系の水路構成

本稿で取り上げる分水系の発電所配置を図1に示す。このうち今回の分水系ALRシステムの対象としたのは、上流側から長沢発電所、分水第一発電所、分水第二発電所、及び分水第三発電所(以下、“長沢”“分一”“分二”“分三”という。)の4発電所である。これらの4発電所は一つの水系で結ばれているが、各発電所間の水路構成には以下に記載する各々異なった特徴がある。

2.1 長沢～分一間の水路構成

- (1) 長沢から放流された水は吉野川を流れるため、長沢から吉野川取水えん(堰)堤(以下“吉野堰堤”という。)の間で約20～50分の流下時間遅れがある。
- (2) 吉野堰堤の貯水容量がほとんどないため、長沢の放流量は分一の使用水量から大森川取水堰堤(以下“大森堰堤”という。)へ流入する自然残流を差し引いた水量とほぼ同一

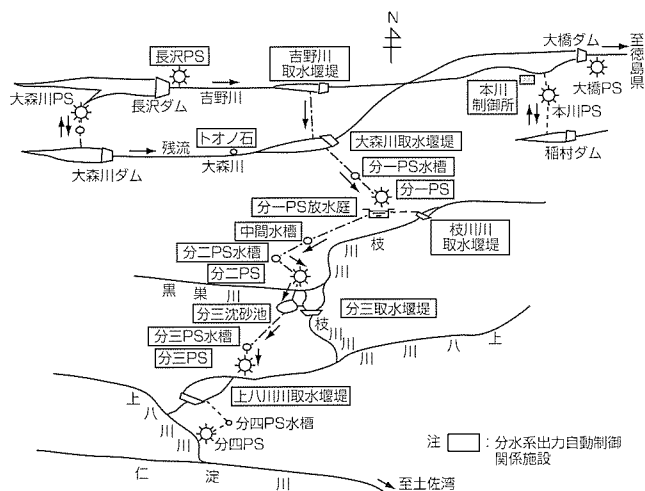


図1. 分水系の発電所配置図

である。なお、自然残流量はトオノ石水位から計算で求められる。

- (3) 吉野堰堤、大森堰堤を経て分一水槽までが圧力すい(隧)道で結ばれているため、吉野堰堤の水位上昇に伴ういっ(溢)水又は大森堰堤水位低下による圧力隧道への空気吸い込みを避けなければならない。

- (4) 分一が最大出力で運転中、吉野堰堤水位は損失水頭のため、大森堰堤水位よりも約1.3m高くなる。

2.2 分一～分二間の水路構成

- (1) 分一放水庭は貯水容量がほとんどなく、放水庭底部よりも比較的低い水位で溢水に至るため、分一の放水量が分二の使用水量よりも多ければ、直ちに危険水位まで上昇する。
- (2) 中間水槽の水位によって分一放水庭と分二間を流下する水が連続となって圧力水路となる場合と、水が連続せず圧力水路にならない場合の両方のケースが存在する。
- (3) 水槽水位が低下して鉄管中に空気を吸い込む可能性は分二水槽が最も高い。

2.3 分二～分三間の水路構成

分三沈砂池及び沈砂池に隣接する分三取水堰堤の貯水容量が小さいため、枝川川への溢水を防止するよう、分三の使用水量を分二の放流量とほぼ同一にする必要がある。

3. 既設システムと問題点

3.1 既設システムハードウェア構成

既設システムは、プラントコントローラを対象発電所それぞれに分散配置し、直近の発電所とCDTによって通信接続した構成としていた。CDTは、データの送信方向を上流→下流へ固定しシステムの簡素化を図っていた。なおCDT伝送項目以外の情報で伝送が必要なものは、各発電所テレコンシステムを経由して信号授受を行っていた。

3.2 分水系運用の現状

分水系の最新の運用は以下のとおりである。

- (1) 電源の大規模化/多様化によって分水系の役割が変化し、電力需給バランス調整の役割は少なく、出水時は連続運転、減水時は昼間運転/夜間停止のパターン運用となっている。
- (2) 常時の運用は、出水調整に対する期待が大きく、停止時の使い込み運転の頻度が多い(使い込み：発電所停止時には上水槽水位を低くしておき不意の出水に備える。)
- (3) しかしながら、小容量の直列堰堤であるため、降雨量に応じて速やかな河川運用が必要であり、降水時にはきめ細かい運転が行われている。
- (4) 近年のレジャー人口の増加に伴い河川利用者が多く、堰堤放流、発電放流量増加については極力急増を行わないよう運転上の注意が払われている。

上記のとおり、分水系の運用が変化し、既設ALRシス

テムに対し機能追加，変更要求が増大してきた。

3.3 ALR運用上の具体的問題点

既設ALRには一貫起動／停止と呼ぶ水系全発電所の順次起動／停止の機能が具備されていたが，起動→並列→一定出力運転のパターン制御ではなく，上流流入量に応じて起動・出力調整する水位調整制御に主眼を置いたシステムであったため次の問題点があった。

(1) 起動時の水位が自動水調曲線から逸脱していると急激な出力の増加及び長時間の無負荷運転などが継続する。そのため，近年は，分水系立ち上げは手動で行い並列後の負荷調整をALRで行うような運用となっていた。これは，分水系を需給バランス調整に活用するという運用上の設計条件が“停止時：使い込み主体，運転時：一定出力運転”へ変化したためである。

(2) 既設システムでは，分水系一貫起動時，各堰堤水位に関係なく下流(分三)発電所から起動させる方式であったため，並列後，出力上昇に移るまで上流側放流による堰堤水位上昇を待たねばならず，無負荷運転時間が長くなっていた。

(3) 発電所内の複数台の主機については，先行機／後行機の順に起動させるが，先行機並列後，一定時間後に後行機を追加起動させる方式であったため，(2)項の堰堤水位の上昇に更に時間が掛かる状態となり，主機の低出力運転が長時間となっていた。

(4) 分水系一貫停止時は，運用上パターン運転であることより，速やかに上流堰堤を使い込み，停止させたいが，水調曲線によって出力を下げるため堰堤の使い込み時間が長くなる。

(a) 分一

- 吉野堰堤，大森堰堤を使い込み，任意の水位で停止できない。
- 吉野水調曲線で分一出力を低下させるため，使い込み時間が長くなる。

(b) 分一

- 分一放水庭～中間水槽の使い込みができない。
- 分一使い込み中，分二は2台運転であるため，単機当たりの低出力運転が続く。

(c) 分三

- 一貫停止時は2台同時に自動停止するが，枝川川からの残流が多い場合は上流の分二停止後も応水運転を継続させる必要があり，2台停止後に運転員操作で応水モードへ切り換えて再度起動させている。
- 分一，分二使い込み運転中，分三は2台運転であるため，単機当たりの低出力運転が続く。

く。

(5) トオノ石の流量変化に対しても，上流堰堤容量の少ない分一で対応するのではなく，分一出力を一定として最も大きなダム調整能力を持つ長沢の自動出力調整で対応したいが，しかし，既設ALRにはこの運転モードがない。

(6) 分水系下流には河川立ち入り者が多く，一貫起動／増発に当たっては一定レートで放流量を増加させる必要があるが既設ALRにはこの機能がなく，結果的に，分水系立ち上げは手動で行い，並列後の負荷調整をALRで行っていた。さらに，長沢発電所～吉野堰堤間は通常の河川を經由して放流するため，ダム操作規定12条で規定されている下流水位上昇30cm／30分以下を遵守する必要がある。このため起動／増発時には運転員手動操作によって放流量を調整していた。

4. 新システム／制御方式

4.1 システム構成

ALRシステムの構成検討に当たっては，既設と同じ分散システムを採らず，経済的に有利な集中システムを採用することとした。総合システム構成を図2に示す。

発電所テレコン(系制テレコン)とALRシステムを分離し，中枢部であるALRコントローラは分水系の保守地点である分三に配置した。従来の水系の集中制御装置には計算機を用いるケースが多かったが，今回は，対象発電所数，経済性，保守性を考慮してプラントコントローラを適用し，テレコンで各発電所の端末と組み合わせた。

4.2 制御機能

前記3.3節記載の運用上の諸問題に対し，以下の改善を行った。

- (1) 現状の分水系の運用に合わせ，一貫起動／停止，出力調整の改善，各所水調曲線の見直しを実施した。また，モード切換え時など水調曲線から逸脱している場合に出力急変が懸念される発電所は，一定レートで目標値を変化させるバンプレス切換えを採用するなど，分水系ALRの運用に要求される条件を満足し，運転員の負担を軽減した。
- (2) 起動順序を水系の水位条件で変更し，起動の際に問題

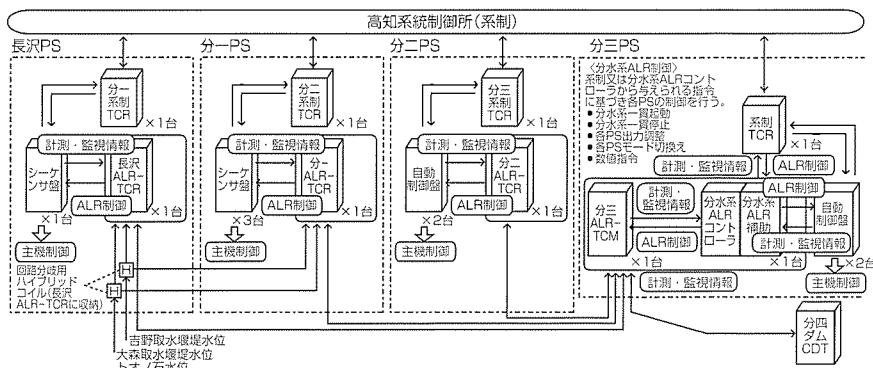


図2. 総合システム構成図

となっていた長時間の無負荷運転を回避した。

(3) 分一最終目標出力を数値設定できるように変更し、分一以下の発電所は、先行機をまず全台起動し、その後、分一最終目標出力によって運転台数を順次追加するよう改善した。これにより、各所堰堤水位が低い場合の水位の回復時間を短縮し、各発電所に複数台ある主機の長時間の無負荷運転を解消した。

(4) 吉野堰堤、大森堰堤ほか各堰堤、水槽の使い込み停止操作を省力化するため、各所において以下の改善を実施した。

(a) 分一

使い込み時間を短縮するため、長沢からの流下遅れを考慮し、長沢停止後20分間は分一可能最大出力で吉野堰堤及び大森堰堤を使い込む。その後、吉野堰堤及び大森堰堤水位貯水量によって、順次、運転台数を減らすことにより、吉野堰堤及び大森堰堤を最短時間で使い込むよう改善した。また、一貫停止の際、停止水位を任意に設定可能なシステムとすることにより、運転員の監視・調整業務を容易にした。

(b) 分二

既設一貫停止の分二停止条件は、放水庭水位の条件のみであり、2台同時に停止するものであった。まず、分一放水庭～中間水槽の使い込みを実現するために分一停止条件を考慮した。分二後行機停止条件は、分一2台停止かつ分一放水庭所定水位以下かつ分二所定出力以下とした。これは、先に後行機を停止させておくことにより、単機当たりの低出力運転継続を解消するためである。また、次回起動時まで都合の良い水位を維持させるため、分二所定出力以下かつ放水庭所定水位以下で自動で応水モードに切り換えるようにした。

(c) 分三

既設一貫停止の分三停止の条件は、分三沈砂池水位条件のみであり、さらに、当該条件によって分三2台とも同時停止するものであった。上流側発電所使い込み中に2台による単機当たりの低出力運転を回避するため、分三後行機停止条件を分二後行機停止かつ分三沈砂池所定水位以下かつ分三所定出力以下とした。枝川川からの自流分が多い場合に備え、分二が応水モードになった時点で分三も自動で応水モードとし、自流分を消費させた後に停止させる。

(5) 降雨による残流分増加時、長沢ハイダムの調整能力を生かして、分一を一定出力運転で吉野堰堤水位による逆調制御ができるようにした。

また、トオノ石流量が多い場合は吉野堰堤の水位が高くないように長沢出力を抑え、少ない場合は吉野堰堤の水位が低くないように長沢出力を増加する必要があるが、トオノ石流量に応じて吉野堰堤の目標水位を自動補正し、流量の変化に対して大森堰堤の溢水や分一圧力隧道へ

の空気吸い込みを発生させないようにした。さらに、トオノ石流量を任意に設定可能とし、各種の河川状況に柔軟に対応可能とした。

(6) 分一ALRモードによる分一出力目標値を任意に設定可能とし、その目標値までの変化レートは一定となるようにした。特に一貫起動時の立ち上げレート(一貫起動開始～分一定格出力までの時間)を河川に立ち入り者が多い夏季を4時間、冬季を2時間と定め、これを守る制御をするようにした。長沢からの放流に関してもダム操作規定12条に基づいた自動運転を可能とした。

4.3 事前シミュレーションの実施

ALRシステムの更新に当たり、現地調整時点での制御ロジック変更を最小限に抑えるため、水系のモデル化を行い、制御ロジックとともにEWS上に制御ループを構築した。あらかじめ水系モデル+既存制御ロジックでシミュレーションを実施し、現地有水試験との合致を確認することで水系モデルの正当性を確認した上で制御部分を新ロジック案と入れ替え、新ロジックの妥当性を事前検証した。このシミュレーションで様々なパターンにおける挙動を検証しながら新ロジックの確立を行い、現地試験時には行えない各種モードにおける機能確認、大まかな制御定数の目途を立てた。

5. 現地試験

現地有水試験は、各種の出水パターンでの制御の正当性、設定値チューニングを実施するため、約1年間の仮運用を行った。通常運用における確認、不適合項目の抽出は客先で実施願ひ、ソフトウェア改修時及び特徴的な運転を行う際には当社試験員が現地に出張して調整を繰り返した。これにより、降雨などの季節変動も織り込んだ調整が実施できた。また、各運転パターンにおいて、安定した主機の出力制御ができることを確認できた。

6. むすび

以上、分水系に納入したALRシステムについて紹介した。複雑な水路系を流下していく水を制御するこのALRは、水系全体の制御方針、装置に期待する機能の範囲などを事前に明確に定めること、及び制御方式の妥当性を水系モデルでシミュレーションすること等によって複雑な制御を高度な機能を持って実現することができた。今後、このような制御にプラントコントローラを導入するに当たり、製作設計着手前の目標機能の明確化がますます重要になっていくであろうと考えられる。

最後に、このシステムの設計・製作・試験に当たり多大な御意見、御尽力を賜った四国電力(株)始め関係各位に深く感謝する次第である。

東京電力(株)葛野川発電所 2号機の概要

岡崎勝広*
橋 浩司*
岩崎純弘**

要 旨

東京電力(株)葛野川発電所は山梨県で唯一の揚水発電所として出力160万kWで計画され、三菱電機(株)と三菱重工業(株)は単機出力40万kWの2号機を納入した。

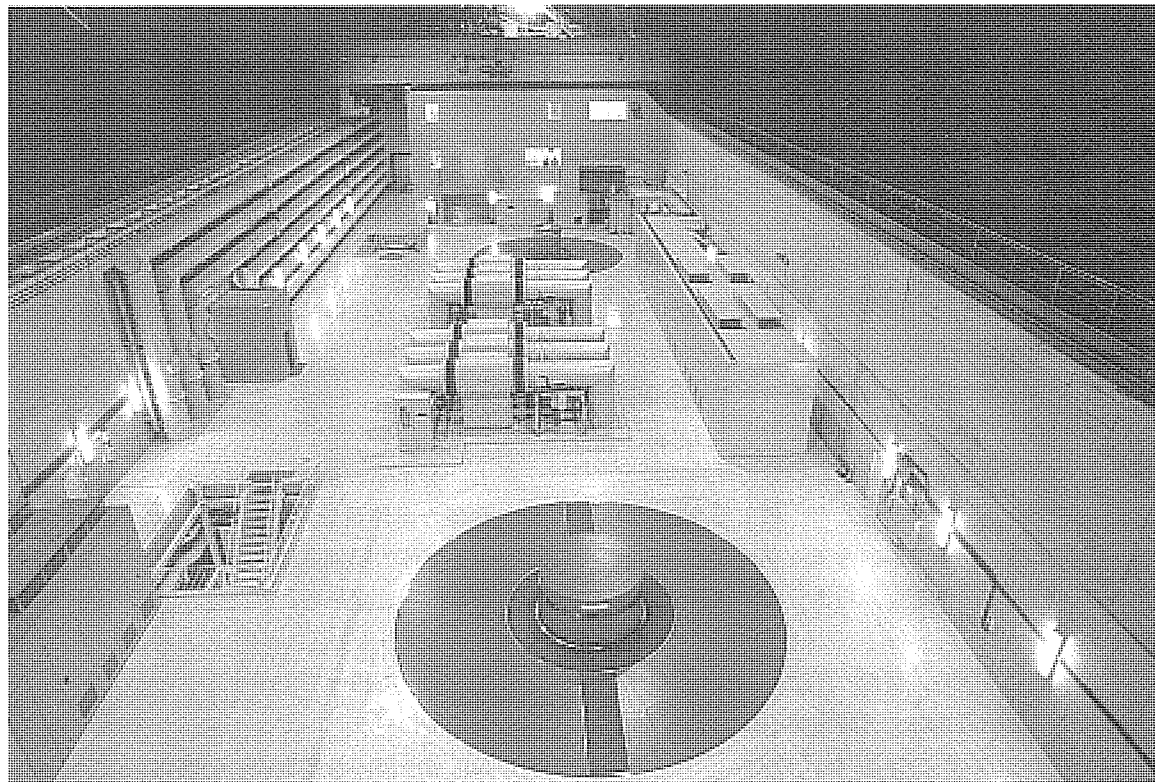
葛野川発電所は、東京電力(株)で8番目の揚水発電所で、昼は発電運転による電力を首都圏へ供給し、夜は余剰電力を利用して揚水運転を行い下部ダムの水を上部ダムに上げて次の発電運転に備える純揚水式の水力発電所である。

2号機は1996年に着工し2000年6月に営業運転を開始した世界最大の超高落差・日本最大の大容量の最新鋭揚水プラントであり、そのために当社と三菱重工業(株)は東京電力(株)との4年間の共同研究を行い、ポンプ水車のランナ、発

電電動機のスラスト軸受などの開発検証を行い製品に反映した。

一方、最新鋭揚水プラントの制御装置と保護装置は、信頼性を重視したデジタル方式のCPU二重化システムが採用された。また、当社は1、2号機用の主回路開閉装置(GMCS)、相分離母線(IPB)及び主要変圧器を併せて納入し、順調に運転されている。

本稿では、葛野川発電所2号機のポンプ水車と発電電動機の概要、開発検証及び構造上の特長と試験結果について述べる。



東京電力(株)葛野川発電所 2号機

写真は2号発電電動機側の上部から見たF1階の全景である。2号発電電動機の奥側が2組の並列用遮断器(GMCS)であり、更にその奥が1号発電電動機、配電盤棟である。並列用遮断器の左側に見えるのが発電電動機と主要変圧器を接続する主回路用の相分離母線(IPB)で、右側に見えるのがサイリスタ始動装置である。

1. ま え が き

2000年6月8日に、揚水機として世界最大の有効落差(714m)、日本最大の単機容量(412MW)となる葛野川発電所2号機が営業運転を開始した。

このプラントは山梨県大月市にあり、上部ダムは富士川水系の日川にロックフィル式ダムを、下部ダムは相模川水系の土室川に重力ダムを築造し、発電所の建屋は地下に建設されている。上部ダム-発電所-下部ダム間は約8kmに及ぶ鉄管導水路で結ばれた純揚水式発電所である。

三菱電機(当社)が納入した設備はポンプ水車、発電電動機から主回路主要設備までの広範囲に及び、最新技術が集約された最新鋭の揚水プラントである。

本稿では、この葛野川発電所2号機のポンプ水車と発電電動機について、概要、新技術を適用した構造上の特長などについて述べる。

2. 納入設備と建設工程

2.1 納入設備

表1に当社が納入した設備を示す。

2.2 建設工程

1988~1991年：ポンプ水車と発電電動機の共同研究

1993年：主要機器受注

1996年：工事着工

1997年~1998年：主要機器の工場出荷

1999年6月~2000年5月：現地無水・有水試験

2000年6月8日：運開(営業運転の開始)

3. ポンプ水車

3.1 ポンプ水車の概要

葛野川発電所のポンプ水車は従来の実績を超える高落差、大容量機であり、主要諸元を表2に示す。

単段機としては世界最高落差となるこのポンプ水車の設計と製作に当たっては、'88年から10年間余にわたって各種要素技術に対する研究及び検証試験を実施し、2000年6月には営業運転に入った。図1にこのポンプ水車の鳥瞰図(瞰)図を示す。

3.2 開発検証及び構造上の特長

(1) ランナの開発

ポンプ水車の主要部品であるランナに対しては、超高落差化に対応した振動強度確保と水力性能に対する検証が重要な課題となる。これら課題に対しCFD(Computational Fluid Dynamics)による流動解析及びFEM(有限要素法)による構造強度解析並びに模型試験による性能及び振動強度検証を実施し、製造面でも高品質ランナの製作のための各種検証を行った。

図2に実揚程モデルランナを示す。

表1. 主要設備の概要

ポンプ水車 (三菱重工業株)	412MW(水車)/438MW(ポンプ) 500min ⁻¹
発電電動機	475MVA(発電機)/438MW(電動機) 500min ⁻¹ 18kV
主回路開閉装置(GMCS)	24kV, 16kA 定格遮断電流: 110kA
相分離母線(IPB) (ABB社から購入)	主回路: 24kV, 16kA 分岐回路: 24kV, 350A
主要変圧器	950MVA(2×475MVA) 525/18kV, 導油水冷式
主回路キュービクル	励磁変圧器盤, PT盤, NGR盤
調速機	電気リターン式
励磁装置	サイリスタ式
運転制御装置(シーケンサ)	プラント監視・制御装置
保護継電装置	主機, 変圧器, 母線保護
その他	揚水安定化装置 総合監視システム

表2. ポンプ水車の主要諸元

		ポンプ水車仕様
水車	最高落差 (m)	728
	水車最大出力 (MW)	412
	回転速度 (min ⁻¹)	500
ポンプ	最高揚程 (m)	779
	ポンプ最大入力 (MW)	438
	回転速度 (min ⁻¹)	500

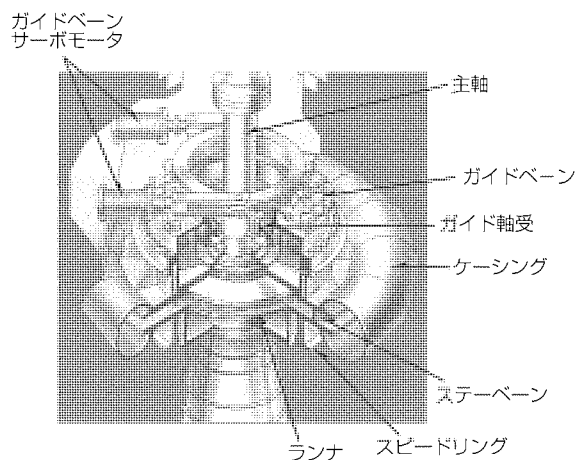


図1. 2号機ポンプ水車の鳥瞰図

(2) 主軸封水装置の開発

超高落差ポンプ水車では、封水装置部での周速が従来機を大きく超え30m/s程度となり、ドラフト部押し込み水圧も120mを超える高封水圧条件であることから、新たにメカニカル方式のカーボン材を利用した封水装置を開発し模型試験による検証を実施した。

(3) ガイド軸受

主軸受では、高速大容量化によって軸受の周速が早くな

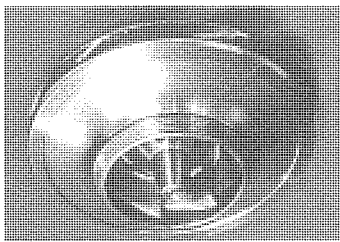


図2. 実揚程モデルランナ

ることから軸受損失の低減をねらった低粘度油が採用され、それに対応した軸受の形状を選定した。また、冷却方式として外部冷却方式を採用した。

(4) 上カバー止水パッキン構造

上カバーとスピードリング部の止水パッキン部の構造について、高圧化に対応するため上カバーの剛性設計に配慮するとともに、パッキン部に対しても数値解析によるパッキン材及びパッキン溝形状の違いによる変形・面圧検討を行い、要素模型試験によって起動停止による上カバーとスピードリングのすき(隙)間変化を模擬した試験を実施し、信頼性あるパッキン材及び溝形状を選定した。

(5) 調相運転時の漏気現象

高落差化に伴ってドラフト押し込み水圧が高くなり、また周速も高速になるため、水面押し下げ状態での連続調相運転時の排水効果及びドラフト下流側への漏気現象に対して厳しい条件となり、各種ドラフト形状及び各種排水管条件での模型試験を実施し、安定した調相運転を可能とする排水管方式及び下カバー構造を採用した。

(6) 調速機の開発

従来方式よりも即応性を高めるため、機械リターン方式から電気リターン方式とし、アクチュエータを省略した電機油圧式制御器と主配圧弁を一軸上に配置したコンパクトな構造とし、大幅な調速性能の向上及び保守性に優れた調速機を開発して採用した。

3.3 現地据付けと現地試験

現地据付けは'96年に開始され、'98年8月にはポンプ水車ランナのつ(吊)り込みが実施された。

図3に現地でのランナ吊り込み状況を示す。

現地据付けの各ポイントにおいて、品質確認のための総点検を実施した。また、現地試験では、発電・揚水・過渡運転特性において良好な結果を得た。

4. 発電電動機

4.1 発電電動機の概要

発電電動機的主要な仕様は次に示すとおりである。

- 形式：立軸回転界磁水冷熱交換器形(準かさ形)
- 出力：475,000kVA(発電機)／438,000kW(電動機)
- 電圧：18,000 V



図3. ランナ吊り込み状況

電流：15,236 A(発電機)／15,236 A(電動機)

周波数：50 Hz

力率：0.85(発電機)／0.95(電動機)

回転速度：500 min⁻¹

はずみ車効果：5,430 t・m²以上

無拘束速度：750 min⁻¹

短絡比：0.8以上(発電機ベース)

励磁方式：サイリスタ励磁方式

始動方式：サイリスタ始動及び低圧同期始動方式

この発電電動機は、単機出力は国内最大の475,000kVA、また空冷発電機の設計難易度を示す指標MVA×min⁻¹は237,500と世界最大級で、あらゆる面で従来実績を大きく上回る世界最大級の記録品であり、その設計と製作に対しては各要素技術について確固たる検討及び検証を実施した。またこの発電電動機の設計審査／品質展開活動については、東京電力㈱のご指導の下、設計から製作・現地据付け試験にわたる全工程で実施し、製品の信頼性の確立に大きく寄与した。

図4に発電電動機の構造断面図を示す。

4.2 設計及び構造上の特長

(1) 固定子

固定子は12分割として陸送トレーラ輸送による現地搬入とし、鉄道輸送実施の際に生じる輸送費アップの低減及び客先での貨車輸送申請諸手続の簡素化を実現した。

固定子コイルをスロット内に固定するくさび(楔)部にタービン発電機向けに実績のあるリップスプリングを適用し、長期運用による固定子コイルの緩みを防止するよう配慮した。

(2) 回転子

運転中の回転部に発生する多大な遠心力に耐え得る機器

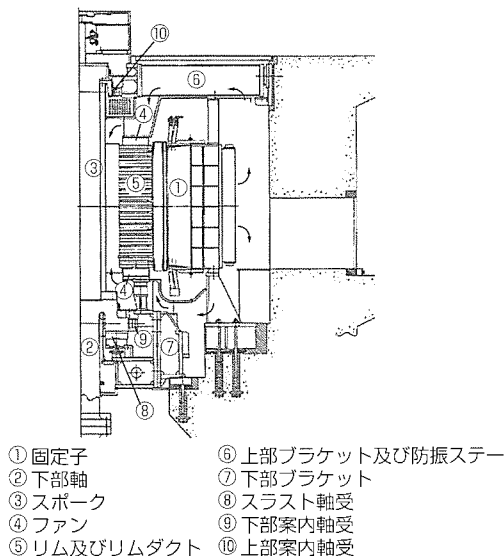


図4. 475,000kVA発電電動機構造断面図

とするために新型ダブテイルを適用し、その信頼性について、実物大モデルでの強度検証試験を実施した。

(3) スラスト軸受

スラスト軸受は、最大設計荷重16.4MN、常時設計荷重14.2MN、軸受平均面圧3.9MPa、軸受外周速度72.3m/sの高荷重高速の記録品である。

この軸受設計に際しては、従来の断熱理論に基づく解析に替え、軸受油膜特性と軸受パッド内の熱伝導及びパッドの熱変形・荷重変形の連成解析が実現できる熱流体潤滑理論(TEHD)に基づく解析手法を新たに開発して適用した。これにより、定常状態のみならず、起動・停止状態などの実際の発電電動機運用上考えられるあらゆる運転状態に対して安定な軸受設計を実現した。

さらに、軸受性能信頼性検証のため、本体製作に先立ち、軸受諸元実物大スラストパッドを被試軸受として用いた実負荷検証試験を実施し、定常運転状態や起動停止状態などのあらゆる運転状態での軸受特性を検証してその信頼性を検証し、かつ上記新設計手法の精度についても併せて実証した。

なお、この検証試験に際しては、今後計画されている全プラントの運転条件を包含した荷重・周速条件を設定して実施し、更なる高速大容量化へも十分対応できることも併せて実証した。スラスト軸受実物大検証試験の検証範囲と試験装置の概略を図5に示す。

(4) 自冷通風方式

高速大容量機であることから、回転子自身は多大なファン効果が得られることになる。このファン効果を最大限に利用でき、別置電動ファンの省略によるコスト低減、保守点検の簡素化及び電動ファン設置スペースの省略による機器体格の縮小が実現できる“リムダクト+ラジアルファン併用自冷通風方式”を適用した。

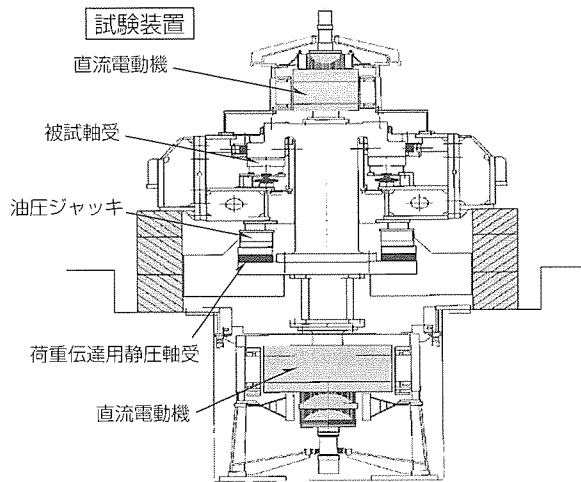
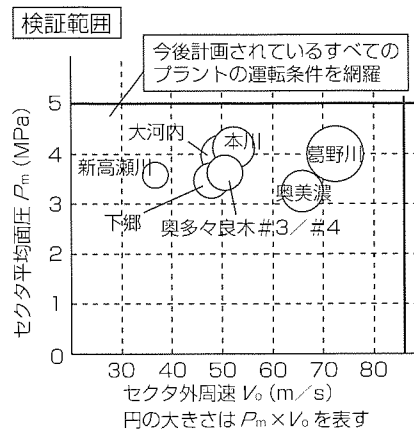


図5. スラスト軸受検証試験の検証範囲と試験装置

(5) 防振ステー

軸方向の長さが長大な高速機であるため、軸振動の抑制も従来機以上に設計上の留意が必要となる。

この軸振動抑制の対応として、軸受部剛性中の防振ステー部の剛性を上げるため、ステーの本数を旧来実績の8本から12本とした。さらに、上部/下部ブラケット胴部の剛性を上げるため板厚を従来機よりも厚くする設計とし、案内軸受部剛性を従来機よりも上げるように配慮した。

4.3 試験結果

発電電動機の実験については工場試験で測定を実施し、保証値を十分に満足する結果を得た。また、現地有水試験では、発電、揚水及び調相運転での発電電動機各部の温度と振動を測定し、良好な結果を得た。

5. むすび

当社の東京電力(株)への揚水プラントの納入は、32万kW×2台の新高瀬川1, 3号機('81年営業運転開始)以来18年ぶりであった。世界最大の有効落差、日本最大の単機容量の最新鋭揚水プラントを完成させることができたのは東京電力(株)のご指導と三菱重工業(株)の関係部門各位の努力のたまものであり謝意を表する次第である。

超小型でしかも高機能・超高速処理を実現し、かつ従来よりも使いやすさを飛躍的に高めた次世代シーケンサ MELSEC-Qシリーズをご紹介します。

コンセプトは“進化と継承”で、最先端技術の導入によって従来のシーケンサの常識を破る超高性能を実現するとともに、従来からのMELSECのプログラム資産を継続使用する機能もサポートし、安心して使用できる夢のシーケンサの登場です。

特長

1. 省スペース・省配線のために

取付け面積で、従来小型機種(AnSシリーズ)比60%の小型化を実現しています。

2. 設備の高性能化・高精度化のために

CPUユニットをマルチプロセッサ構成とすることで、LD命令34nsの超高速処理を実現しました。4kステップのプログラムで0.5msのスキヤンタイムが実現可能です。

3. 最適システム構築のために

プログラム容量は業界最大の252kステップ、制御I/O点数はCPUの種類に関係なく4,096点で、大規模システムにも余裕で対応できます。

4. メンテナンスを簡単にするために

プログラミングツール(MELSOFT GX Developer)で、一般電話回線、ISDN回線を通して、遠隔地のQシリーズシーケンサに対し遠隔プログラミングが可能です(モデム要)。また、一部のトランジスタ出力ユニットは短絡保護機能があり、結線間違いなどによる焼損から出力ユニットを保護します。

5. 情報化のために

Ethernetユニットは、普及が著しいインターネットを活用した電子メール送受信機能を装備しています。世界中のどこへでも、設備の情報を電子メールで送ることができます。

6. シーケンサを使いやすくするために

インテリジェント機能ユニット用ユーティリティソフトウェアをMELSOFT GX Developerに追加インストールすることで、インテリジェント機能ユニット用のプログラムの設定が簡単に行えます。

7. プログラム開発・デバッグ効率向上のために

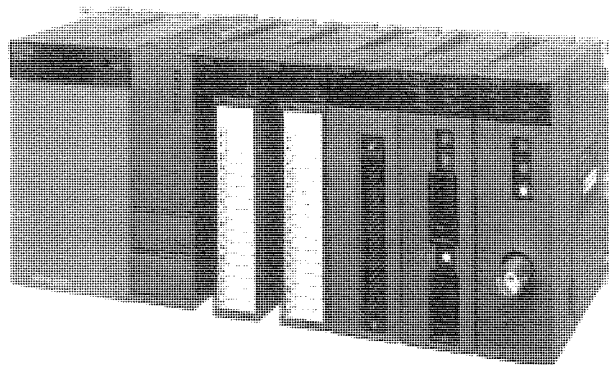
12MbpsのUSBポート及び高速115.2kbpsのRS-232ポートをCPUユニットに装備しており、プログラムのアップ/ダウンロード時間を飛躍的に短縮できます。

8. 従来資産の活用のために(互換性維持)

従来のAやQnAシリーズのプログラムも、MELSOFT GX Developerで変換することで、Qシリーズでそのまま使用できます。

9. 最適分散システム構築のために

高速バスシステムの採用により、複数のシーケンサCPUやモーションCPUを最大4台まで組み合わせたマルチCPUシステムを構築することができます。これにより、目的に応じて機能ごとにCPUを分散したり、大規模な処理内容を複数のCPUに分散させるなどの最適な負荷分散システムを容易に構築することができます。また、複雑なモーション制御とシーケンス制御が同居する制御対象に対し、シーケンサCPUとモーションCPUのマルチCPU構成を採ることで、省スペースかつ安価に高速制御が可能なコントローラを実現することができます。



MELSEC-Qシリーズの外観

概略性能

項目	仕様	
CPU	入出力制御点数	8,192点(ベースユニットでの最大点数:4,096点)
	最大I/Oユニット数	64ユニット
	プログラム容量	28~252kステップ(CPU機種によって異なる)
	LD命令	34ns(Q02CPUは79ns)
	PCMIX値	10.3(Q02CPUは4.4)
アナロク	データメモリ	28.8Kワード(ファイルレジスタを除く) 500k点(SRAMカード装着時ファイルレジスタ点数)
	入力レンジ	電圧:0~5, 1~5, 0~10±10V 電流:0~20, 4~20mA
	出力レンジ	電圧:0~5, 1~5±10V 電流:0~20, 4~20mA
	チャンネル数	機種によって異なる
	分解能	12/13/14ビット(レンジによる)
ネットワーク	変換精度	±0.1% @25℃
	変換速度	80μs/ch
	Ethernet	10BASE-T, 10BASE5, 10BASE2 電子メール送受信機能あり
リンク	MELSECNET/10H	SI/QSI光ケーブル, 同軸ケーブル
	CC-Link	ツイストペアケーブル リンクスキャン: 1ms(16局リポートI/Oネット時)



特許と新案***

三菱電機は全ての特許及び新案を有償開放しております

有償開放についてのお問合せは
三菱電機株式会社 知的財産渉外部
電話(03)3218-9192(ダイヤルイン)

レジスト被覆膜材料，その形成方法とそれを用いたパターン形成方法および半導体装置

(特許 第2956387号，特開平6-45246号)

発明者 塙 哲郎，熊田輝彦，笹原敦子，田中祥子，堀辺英夫，久保田 繁，肥塚裕至

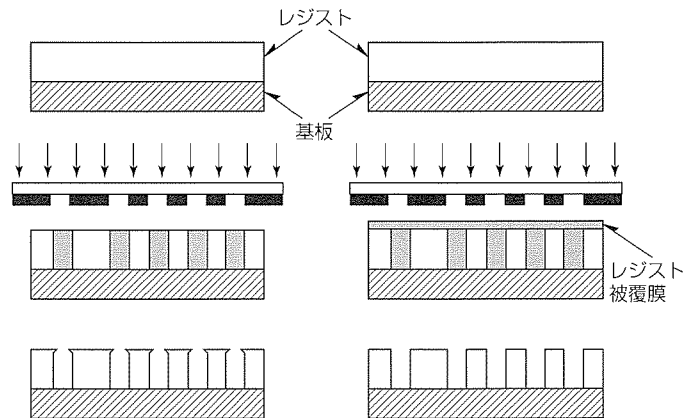
この発明は，半導体デバイスなどの微細パターン形成プロセスに用いられる化学増幅型レジストの膜上に形成される被覆膜に関するものである。

半導体デバイス製造において，KrFエキシマレーザ，電子線又はX線を用いた微細パターンの形成には化学増幅機構を利用したレジスト材料が広く用いられている。化学増幅型レジストは，露光によって生じた微量の酸が触媒となり反応を促進するため，レジスト感度を高くすることができるという利点がある。しかし，実プロセスにおいて，クリーンルーム雰囲気中の塩基性成分がレジスト膜表面に吸着することで酸の活性が失われるため，均一なパターンの形成ができないという問題点があった。

この発明はレジスト上に酸性の物質を含んだ被覆膜を形成することで上記問題点を解決できることを示している。レジスト膜上に酸を含む膜を形成し，この酸の作用によって雰囲気中の塩基性成分を中和させる。こうすることにより，露光によって生じた酸の活性が

失われずに触媒機能を果たすため，均一なパターン形成が可能となる。

この発明の方法はレジストを雰囲気中の塩基性成分から保護する機能のみならず反射光を防止する機能を持たせることも可能であるため，反射防止膜としても有効に働く。



従来例

この発明のパターン形成例

パターン形成材料 (特許 第2964733号，特開平5-113667号)

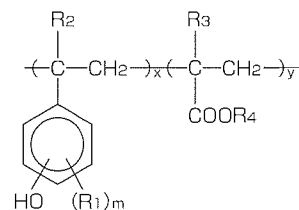
発明者 久保田 繁，熊田輝彦，田中祥子，堀辺英夫，肥塚裕至

この発明は，半導体デバイスなどの微細パターン形成プロセスに用いられる化学増幅型レジスト材料に関するものである。

半導体デバイス製造において，KrFエキシマレーザ，電子線又はX線を用いた微細パターンの形成には化学増幅機構を利用したレジスト材料が広く用いられている。従来の化学増幅型レジストは，フェノール性水酸基を酸不安定基で保護することでアルカリ現像液に対する溶解性を抑制させている。この保護基は露光によって生じた酸の触媒作用で分解してフェノール性水酸基に戻り，アルカリ現像液に対する溶解性が高くなる。ただしこの方法では，未露光部分においてもレジストがある程度溶解してしまうため，現像時に膜べりが発生し，解像力の低下やパターン精度の低下を生じさせている。

この発明は，レジストの主成分であるベース樹脂を図に

示した構造にすることで酸による分解後にフェノール性水酸基よりも酸性が強いカルボン酸基を生じさせ，アルカリ現像液に対する溶解性を高めることによって露光された部分のみを忠実に溶解させるようにしたものである。この発明のレジスト材料を用いることで，高感度で高解像度のパターン形成が可能となる。



(式中，R1はメチル基，R2及びR3は水素又はメチル基，R4は3級アルコール残基又はアリル基を示し，mは0，1，2のいずれかであり，xは0.6~0.9の正数，yは0.4~0.1の正数で，x+y=1の関係を満たす。)



特許と新案***

三菱電機は全ての特許及び新案を有償開放しております

有償開放についてのお問合せは
三菱電機株式会社 知的財産渉外部
電話 (03) 3218-9192(ダイヤルイン)

画像データ検索方法 (特許 第2981520号, 特開平6-68169号)

発明者 阿部 茂, 中村泰明, 亀井克之

この発明は、街路等を撮影して得た写真画像データを、被写体を検索キーとして検索する方法に関するものである。

従来の画像データ検索方法は、写真撮影位置を示す撮影マークを地図上に表示し、その一つを選択することで写真画像データを得る。このため、特定の被写体が写っている写真画像データを検索する場合、その撮影マークをユーザーが識別しなければならず、自動検索ができなかった。

この発明は上記の欠点を除去するためになされたものである。図1、図2に示すように、写真画像データ(3)をカメラ

位置(15)など視野(8)を表す視野データとともに記憶しておく。被写体(6)の座標値(X, Y)が与えられると視野(8)内に被写体(6)が含まれるか否かを判断し、含まれる場合にその視野(8)を持つ写真画像データ(3)を出力するようにした。

以上の構成により、特定の被写体が写された写真画像データを自動検索することができる。

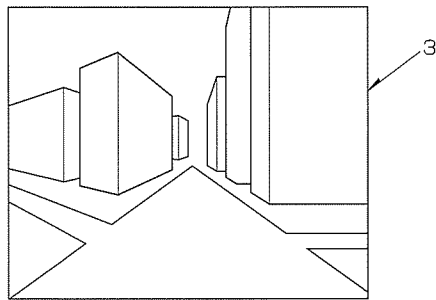


図1

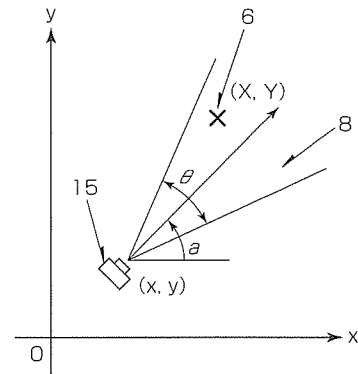


図2

〈次号予定〉三菱電機技報 Vol.74 No.12 「21世紀のニーズにこたえる電力・産業システム」特集

特集論文

- 21世紀のニーズにこたえる電力・産業システムに寄せて
- 電力自由化時代の需要家サービスシステム
- 公共プラントWeb応用監視システム
- CALS環境による企業間設計業務連携とエンジニアリング技術の伝承
- 火力プラントにおける電力CALSの適用と運用管理
- 小型ユニット化を図った超分散型ローカルコントローラ
- Foundation Fieldbus対応小規模計装制御システム

- PIO用シリアルバス制御LSI
- デジタル式タービン監視計器の実機適用と信頼性試験
- ハイブリッド型交流・直流電力系統シミュレータの導入
- オーロラビジョン用新表示素子
- 液晶・半導体工場向けクリーンオゾンガス及びオゾン水製造装置
- シリコン単結晶引上げ装置用超電導電磁石
- 最近のヒートパイプ応用製品
- 高効率UPS“MPC”

<p>三菱電機技報編集委員</p> <p>委員長 鈴木 新</p> <p>委員 中村 治樹 永 峰 隆 藤川 裕夫 河内 浩明 浜 敬三 茅 嶋 宏 佐々木和則 吉原 孝夫 畑谷 正雄 松本 修 村松 洋 西谷 一治 伊藤 敬</p> <p>幹事 鈴木 隆二</p> <p>11月号特集担当 町野 毅</p>	<p>三菱電機技報 74巻11号 2000年11月22日 印刷 (無断転載・複製を禁ず) 2000年11月25日 発行</p> <p>編集人 鈴木 新</p> <p>発行人 鈴木 隆二</p> <p>発行所 三菱電機エンジニアリング株式会社 ドキュメント事業部 〒105-0011 東京都港区芝公園二丁目4番1号 秀和芝パークビルA館9階 電話 (03) 3437局2692</p> <p>印刷所 菱電印刷株式会社</p> <p>発売元 株式会社 オーム社 〒101-0054 東京都千代田区神田錦町三丁目1番地 電話 (03) 3233局0641</p> <p>定 価 1部735円(本体700円)送料別</p>
<p>URL http://www.melco.co.jp/giho/</p>	<p>三菱電機技報に関するお問い合わせ先 cep.giho@ml.hq.melco.co.jp</p>

スポットライト ダム流木／倒木処理システム

環境問題やリサイクル運動が声高に叫ばれ始めた昨今、地域から地球全体の環境問題をとらえたダム流木処理設備を三菱電機は提案します。

発電設備用ダムや多目的ダムなどへの流入物（流木／倒木、刈り草葉等）と発電所／管理所などの施設や送電線管理の際に発生するせん（剪）定枝は、従来ほとんどが焼却処分されてきました。近年ダイオキシン発生防止の観点から焼却が困難となり、流入物の処理に苦慮している問題があります。

そこで、この流木／倒木や草葉等を有効利用するとともに地球温暖化の原因である二酸化炭素の発生を抑制する一つの目的として、流木／倒木を従来焼却処理していたものを焼却しないで炭化する有機物炭素化装置と廃棄植物をリサイクルするたい（堆）肥化装置が適用できます。

これらの装置は、深夜電力の有効活用をねらい電熱を利用してダイオキシンを発生させずに無害で副産物化できます。

特長

1. 有機物炭素化装置

- 無酸素で炎を使用しません。そのため煙の発生はなく環境への影響はありません。
- 無酸素、閉鎖密閉、間接低温熱分解方式なので生成炭素や混入物が酸化されません。

- 生成炭素の固定炭素率が高く、良質な炭素が製造されます。
- 石、砂、金属などが混入しても使用でき、使用有機物の分別の必要性がありません。

この装置は、焼却ではなく熱分解方式を採ります。焼却しない様々な条件を整えることによって、ダイオキシンの発生をほとんどなくすることができます。

生成炭素利用法は、流木に限らずあらゆる有機物が処理できます。

- 木、竹、小枝等は土壌改良材、微生物培養床下保護材に利用でき、燃料などの熱分解時の排出ガスからは木酢、竹酢が作られます。
- タイヤ、発砲スチロールなどのプラスチックは消臭材、プラスチックの増量材、工業原料、燃料などに利用でき、熱分解時の排出ガスからはA重油相当の液化物等が作られません。

2. 廃棄植物リサイクル装置

- 短期間での堆肥（コンポスト）化が可能です（約1か月で良質の堆肥化を実現します。）。
- 抜群の抑臭効果を実現します。コーヒー抽出かす（滓）の特徴であるポーラス（多孔体）構造と発酵槽の密閉構造によって発酵期間中の悪臭はほとんどありません。

堆肥化利用法としては、主に土壌改良材や園芸用肥料等に使用できます。

ダム流木／倒木処理システム

