

水力発電制御・保護技術

戸野塚 武浩(とのづか たけひろ)

三村 英明(みむら ひであき)

竹内 玲治(たけうち れいじ)

1 まえがき

水力発電所制御装置の信頼性向上・保守の簡素化にこたえる手段として、昭和40年代後半から従来の電磁リレー式制御装置に代わって、マイクロプロセッサを応用したデジタル制御装置であるプログラマブルコントローラ（以下、PCと略す）が実用化され、現在広く採用されている。また、最近のPC分野における急速な技術開発により、高機能処理、高速演算、データウェイによる大量データの高速伝送が可能となり、更にCRTディスプレイなどの周辺装置も整備された。これらの結果、従来実用化してきた制御分野のみならず、水車調速機（以下、ガバナと略す）、自動電圧調整器（以下、AVRと略す）、及び監視・保護機能をも包含した水力発電所総合デジタルシステムの構築が可能となった。

本稿では、富士電機における本システムについて紹介する。

2 総合デジタル制御システムの構成

図1に総合デジタル制御システムと構成例を示す。各機能を構成するPCは、プラントの規模・形態に応じて分散・集中配置ができ、データウェイを通じて結合される。また、I/Oユニットも、情報の集中している場所に分散配置することによって最短のケーブルルートで情報を収集することができる。更に前述のデジタル制御装置の機能集約化により、配電盤の縮小化も可能である。

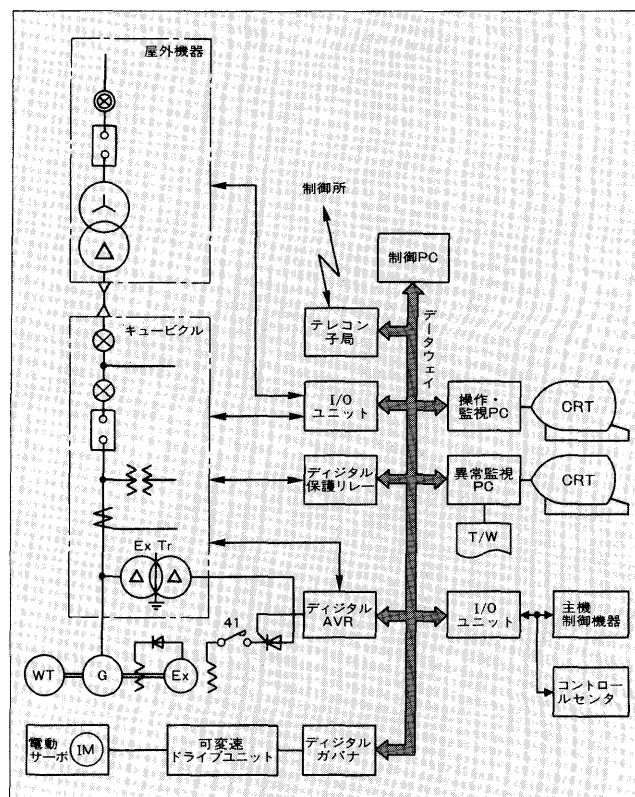
システムの冗長化は、プラントの規模、立地条件などによって定められるべきものであるが、制御・監視機能を構成する部分は中小水力の場合、単一系での適用を基本としている。

3 総合デジタル制御システム主要部概要

3.1 監視・操作システム

従来の発電所における監視・操作システムは、発電機盤

図1 総合デジタル制御システム構成図



に設置された操作スイッチ、表示器、指示計などによって行ってきたが、発電所全体の情報量に対し、器具の設置スペースに限りがあるため、個別情報はローカルへの分散を行い、発電機盤では運用に欠かせない最小限の情報の選択が行われてきた。

総合デジタルシステムでは、各所に配置されたPC及びI/Oユニットからの情報をすべてデータウェイによって結合しているので、CRTディスプレイを適用することによってこれらの情報を有機的に活用することができる。CRTディスプレイ利用には以下の特長がある。

- (1) 操作については、キーボード上に配列された専用キー（あるいはライトペンなど）により操作対象機器を選択し、画面上で確認後、CRTとは別置した制御用押しボタ



戸野塚 武浩

昭和49年入社。発電プラント制御・保護システムの設計に従事。現在、電力システム技術統括部システム技術部。



三村 英明

昭和46年入社。発電所システム設計及び水力発電設備のエンジニアリングに従事。現在、川崎工場水力技術部課長補佐。



竹内 玲治

昭和37年入社。保護リレーの設計・開発に従事。現在、(株)富士電機総合研究所保護制御機器開発部担当課長。

図17 火花号数と出力電圧の関係

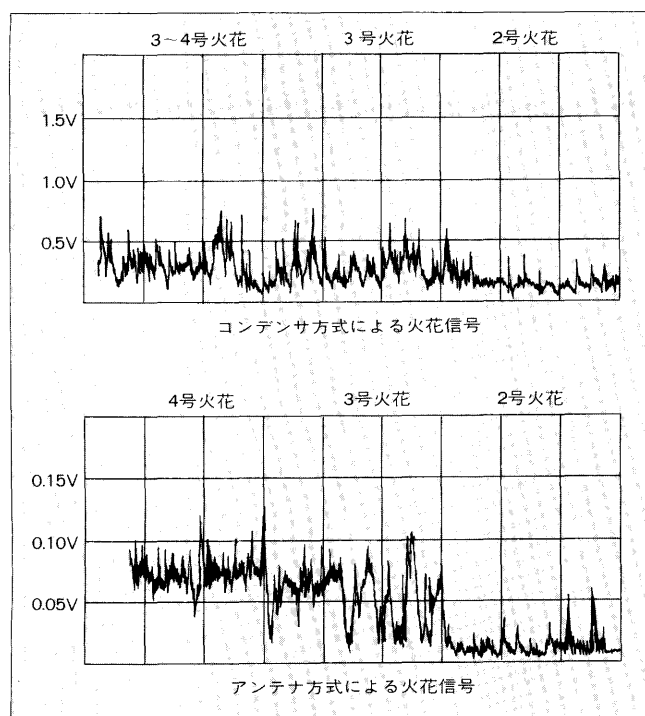
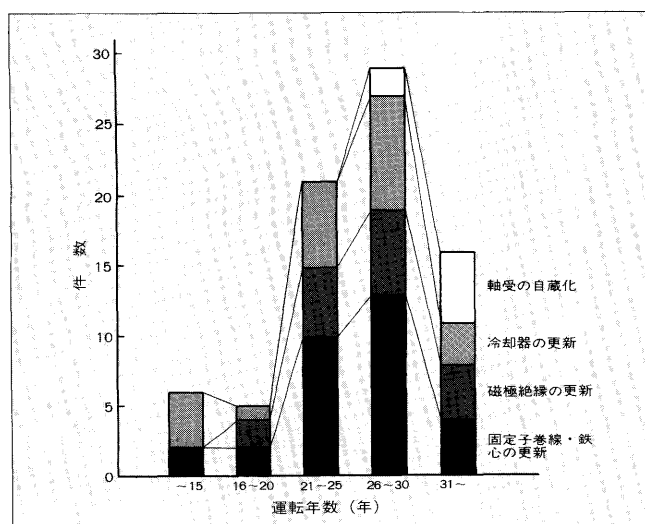


図18 水車発電機の改修・近代化工事の実績



オードの故障検出を除く検出回路は、既にタービン発電機に適用しているシステムと同一である。ダイオード故障検出に関しては伝送システムを簡素化するため、パルスCTの二次出力直列加算による新方式を採用した(特許出願中)。すなわち、ダイオードが健全時はCT二次電圧を加算したものは図16に示すように零となるが、故障した場合には出力が生ずるのでこれを故障信号として利用している。本方式の採用により変調周波数の数を1/6に低減できる。

5.2 ブラシ火花検出

富士電機では、コンデンサ結合による方式及びアンテナによる火花放電電波を検出する方式を研究している。図17に各方式の火花号数と出力電圧波形の相関関係を示す。い

ずれの場合も火花号数と出力電圧の相関関係は良好であり、スリップリングでの火花発生の遠方監視を実用化できることを確認した。しかしながら前者の場合、給電ケーブルに進入した制御機器の外来ノイズに対して弱いこと、また後者の場合、機器の構造により受信感度が異なり汎用性において前者に劣るという欠点を有しているため、設置に際しては環境などを十分調査の上、いずれの方式を採用するか決定する必要がある。富士電機では両方式の欠点を改良すべく、現在研究開発を継続中である。

⑥ 更新技術

既設水力発電設備を有効に活用すべく、近年水車発電機の改修・近代化が進められている。

図18に現在実施されている改修・近代化工事の実績を示す。特に、シェラック絶縁の固定子巻線は予防保全という観点から機会をとらえ、エポキシレジン絶縁の巻線に更新することを推奨している。これら改修・近代化工事の実施により、機械の信頼性向上及び保守・点検の簡素化が図れるとともに、固定子鉄心・巻線更新では効率の向上、巻線温度上昇の低減などの性能向上が図れる。12MVA、400rpm機においては0.3%程度の効率向上が図れた。富士電機は今後共最新の技術を用いてユーザー各位の御要望に沿った改修・近代化を図るべく努力する所存である。

⑦ あとがき

以上、富士電機の水車発電機の最近の技術について、その概要を述べた。

ユーザー各位に富士電機の水車発電機に対する技術について御理解を深めて頂ければ幸いとする。

このほかにも最近の多様化する市場のニーズにこたえるべく、

- ・予防保全技術の開発・実用化
- ・高品質・低コスト機器の開発
- ・新機種の開発

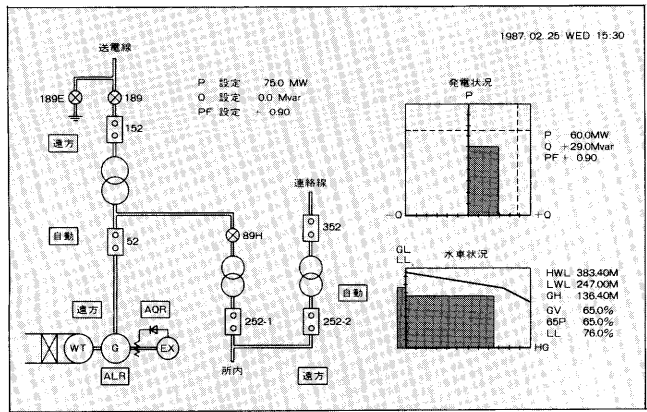
など多くのテーマに対し、ユーザー各位の御指導を賜りながら、積極的に取り組んでいる。

最後に本稿の内容も含め、富士電機の水車発電機技術の今日あるは、国内ユーザーの皆様の御指導に負うところ大であり、ここに心から感謝の意を表する次第である。

参考文献

- (1) 清水照久：磁気軸受の性能と実績、富士時報、Vol.36、No.3、p.219-224 (1963)
- (2) 北原義彦ほか：電源開発(株)佐久間第二発電所納入バルゴ水車・発電機、富士時報、Vol.55、No.4、p.248-253 (1982)
- (3) 井上俊夫ほか：タービン発電機界磁テレメータリング超小型システムの完成、昭和60年電気学会全国大会、No.826 (1985)

図 2 発電機制御画面 (例)



- ンの操作にて指令を出力する二挙動操作とすることにより、誤操作が防止できるとともに、近年、制御所に普及している集中制御装置の操作手順との統一化が図れる。
- (2) 遮断器などの動作表示は、機器シンボル及び母線の発光色変更による充電箇所の判別もでき、状況を明確に表示できる。
- (3) シーケンス状態表示は、関連機器に近接して文字を表示でき、水車・発電機をグラフィック化することによってシーケンス推移が表示できるので、より直接的な状態の把握ができる。
- (4) 計測は、運転状況に応じて表示内容を切り換えることができる。例えば、主機起動過程では、ガイドベーン開度、回転速度、一次調節器の設定位置計測に主眼を置き、並列中は、発電機出力、ガイドベーン開度、落差をプラントの状況に重ねて計測することができる。このように、CRT ディスプレイ表示の利点を生かすことによって、その時々に応じた最適な情報を見やすい形態で表示することができる。
- (5) 故障表示は、発生した故障のみの表示が可能で、単に項目のみでは無く、故障区分、発生・復帰時刻、発生場所、設定値など詳細の関連項目も合わせて表示でき、現象の的確な判断、復旧に当たっての有効な情報提供ができる。

図 2 に発電機制御画面の一例を示す。

3.2 デジタルガバナ及びデジタル AVR

デジタルガバナ及びデジタル AVR は、PC の高性能処理・高速演算機能を生かし、以下の特長がある。

- (1) PID 演算が主体であるが、これに水車・発電機の諸特性を盛り込み、非線形補償を行うことにより、制御性の向上を図ることができる。
- (2) 電気量は電圧・電流瞬時値からの演算で求めることにより、変換器の設置を不要とすることができる。
- (3) 制限機能については、従来の単一設定による制限から非線形演算による制限、外部要因（電圧、周波数など）に応じた制限ができ、機器の限界内での有効な運用を図ることができる。
- (4) 必要に応じ、シーケンス制御などの二次調整機能を付

図 3 デジタルガバナ構成図

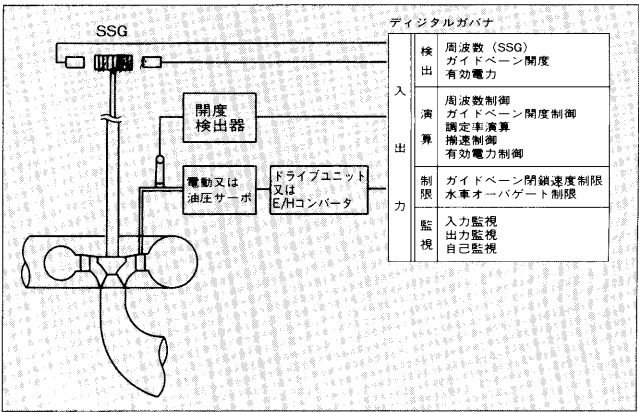
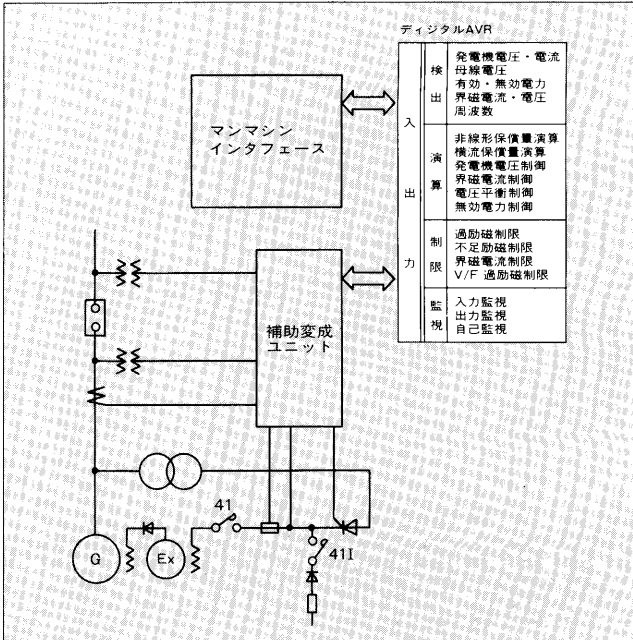


図 4 デジタル AVR 構成図



- 加できる。
- (5) センサ・出力部を含めた装置全体の監視、及び異常発生時の処理が容易となるので、PC など重要部分の故障を除けば、所定の方針に基づき主機の運転を継続できる。
- 図 3 にデジタルガバナ、図 4 にデジタル AVR の構成図を示す。

3.3 異常監視システム

水力発電所は、運転合理化のための集中制御化・無人化が進む一方、発電所の点検は従来どおり保守員の定期巡視にゆだねられている。異常の早期発見によるプラントの運転信頼性の維持・向上、事故の未然防止、巡視点検の効率化、省力化を達成する手段として、現在のセンサ技術、PC の情報処理機能を応用した異常監視システムがある。

このシステムは、直接・間接的に検出された情報に対し適性な入力処理、判断を行いながら設備を連続監視するもので、異常を早期に検出するとともに、異常を検出した時はその前後の関連データを表示・印字し、異常原因の探索、処理に有効なデータを供給できる。連続的に得られるデー

タは、帳票（日報、月報）データ、異常データ、瞬時値データなどのブロック単位にまとめて外部記憶装置に保存し、過去・現在データの任意印字、比較による機器の長期変化なども診断することができる。

また、装置に伝送ユニットを付加し、必要なデータを制御所・電力所に表示することにより、遠隔においても発電所の状態を随時監視するシステムを構成することができる。

監視項目については、事故発生時の影響度、事故発生件数など過去のデータを総合的に検討した結果、次の項目を監視の対象としている。

軸受温度・油面、振動、圧油装置漏油、給水量、漏気、シーケンス動作、補機動作

3.4 デジタル保護リレー

3.4.1 システム構成

デジタル保護リレーは、マイクロプロセッサを応用したデジタルリレーユニットがハードウェアの基本単位になっている。水力発電所保護リレーは信頼性と経済性の両面から、以下に示すシステム構成としている。

- 発電機用と変圧器用の保護リレーを1台のデジタルリレーユニットで構成
- 2台のデジタルリレーユニットを用いて常時直列二重化、故障時単独運転可能

図5にシステム構成ブロック図、表1に保護リレー一覧表を示す。

図5 システム構成ブロック図

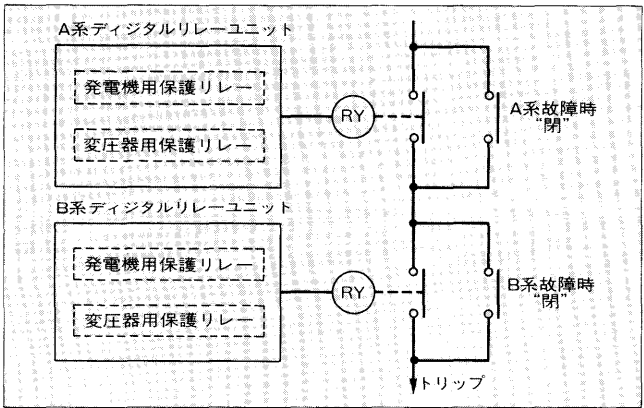


表1 保護リレーの一覧表

適用	デバイス記号	保護リレー名称	保護目的
発電機用	87	比率差動リレー	内部短絡
	87G	比率差動リレー	内部地絡
	59	過電圧リレー	過電圧
	40	界磁喪失リレー	界磁喪失
	51	過電流リレー	過電流
	64N	地絡過電流リレー	地絡過電流
変圧器用	87T	比率差動リレー	内部短絡
	64T	地絡過電流リレー	地絡過電流
	51T	過電流リレー	過電流

図6 発電機保護用過電流リレー アルゴリズムの周波数特性(例)

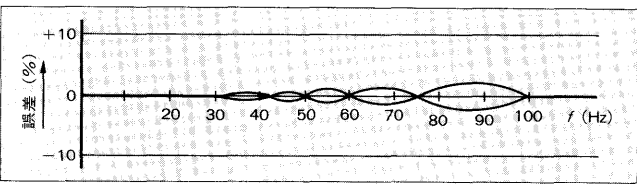
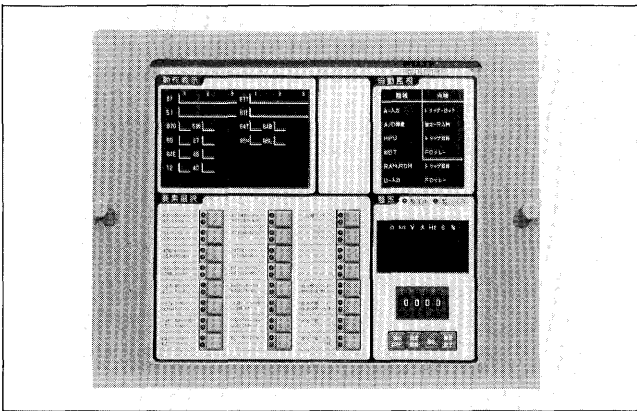


図7 デジタルリレーユニットの外観(例)



3.4.2 保護リレー特性

発電機用保護リレーは、発電機起動時の低い周波数から負荷遮断時の周波数上昇域までの広い周波数帯域で精度の高いことが要求される。この目的に対しては、送変電分野のデジタル保護リレーの演算アルゴリズムは系統の定格周波数を対象としているので、そのまま用いることはできない。このため発電機保護用として、系統入力1周期分のサンプリングデータ数を用いて補正を加える広域周波数変動対策アルゴリズムを適用している。

図6に発電機保護用過電流リレーアルゴリズムの周波数特性(例)を示す。

3.4.3 自動監視

装置に故障が生じた場合には自動点検と常時監視とから成る自動監視システムによって検出し、常時直列二重化システムのうちの健全側1系列の単独運転に自動的に切り換えることにより、稼働信頼度を向上させている。

また故障の早期修復を図るため、ハードウェアブロック単位別の故障部位表示を設けている。

3.4.4 装置構成

保護リレー装置は、電源ユニット、デジタルリレーユニット、点検操作ユニット、補助リレーユニット、入力変成器ユニットで構成し、700mm幅の標準配電盤1面に収納している。

図7にデジタルリレーユニットの外観(例)を示す。

4 電動操作式デジタルガバナ

本章では主として小容量の水車に最近多く使用されている電動操作式デジタルガバナについて紹介する。これは、最新のエレクトロニクス技術、メカトロニクス技術を取り

図8 可変速ドライブユニットブロック図

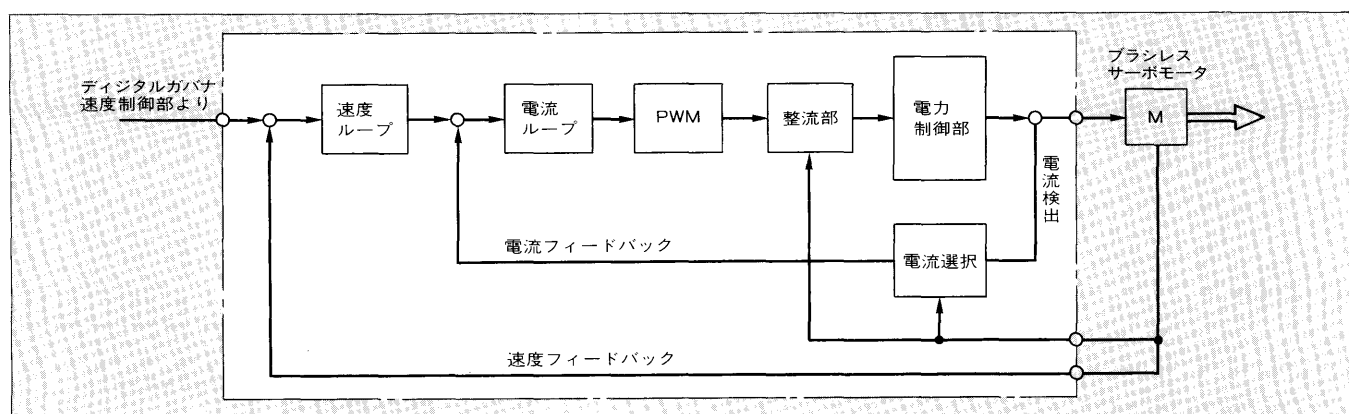
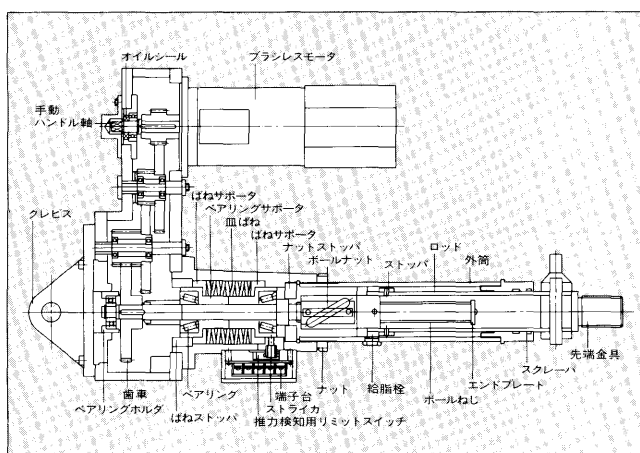


図9 電動操作機の構造



入れて機能向上を図った信頼性、速応性の優れたガバナであり、以下の特長がある。

- (1) 従来の電気油圧式ガバナと同等の性能を有する。
- (2) 圧油装置が不要となるために、水車関連設備の大幅な簡素化が可能となる。
- (3) コンパクトで設置場所の有効利用を図ることができる。

図3のデジタルガバナ構成図に示すように、PCによるデジタルガバナ部のほかに、周波数を検出する歯付円板、近接スイッチ、ガイドベーン開度検出器、電動機を制御する可変速ドライブユニット、回転運動を直線運動に変える電動操作機（電動サーボモータ）などにより構成される。

4.1 検出部

回転速度の検出は、歯付円板と近接スイッチによるデジタル検出方式を採用しており、零回転速度近くから過速度の範囲まで精度よく検出できる。また、ガイドベーン開度検出は、静電容量の変化による電氣的検出方式とし、各々デジタルガバナへの入力信号としている。

4.2 可変速ドライブユニット

デジタルガバナからの出力信号により、ブラシレスサ

ーボモータの制御を行うもので、回転子の位置を検出し、その信号に従って固定子巻線に電流を通じ、この電流値を制御してブラシレスサーボモータを駆動している。このため、応答性が非常に高く、超低速まで安定した運転ができる。

図8に可変速ドライブユニットのブロック図を示す。

また、ブラシレスサーボモータの採用により、以下の特長を有する。

- (1) ブラシが無いので保守が大幅に軽減される。
- (2) 水車運転中にガイドベーンをモータトルクにより位置に保持することができ、位置保持のためのブレーキは不要である。
- (3) ガイドベーンから要求されるトルクの変化に対して、速応性及び速度制御性の良い運転ができる。

4.3 電動操作機（電動サーボモータ）

電動操作機は、電動機の回転力を直線運動に変換させる、いわゆるメカトロニクス製品である。作動部には、ボールねじ及びナットを採用しており、高い伝達効率、少ない摩擦と長い寿命、簡単な潤滑などの利点を持っている。

図9に電動操作機の構造を示す。

5 あとがき

以上、最近の水力発電所の制御・保護技術について述べたが、今後共マイクロプロセッサ技術の応用は一層促進されるとともに、デジタル制御により適したインタフェース機器の開発も進み、幅広い意味での総合デジタル化が進むものと考えている。

また、発電所のオイルレス化の強い要望にこたえるため、より大容量の電動サーボ技術の開発も急務である。

今後共、これら新技術を導入することにより、プラントの運転信頼性向上、保守の省力化に努力してゆく所存であり、ここに、ユーザー各位の一層の御指導と御支援をお願いする次第である。



＊本誌に記載されている会社名および製品名は，それぞれの会社が所有する
商標または登録商標である場合があります。