

中小水力発電設備は、近年、設備の簡素化・合理化、保守の省力化、無公害化のニーズがいつそう高まり、圧油レス化、冷却水レス化、ブラシレス化、の“3レス化技術”の適用が図られている。

当社は、これらのニーズにこたえるために、より高度な技術を駆使し、カプラン（可動翼）水車ランナペーンの電動化、PTFE（四フッ化エチレン樹脂）系材料を適用した新素材スラスト軸受など、業界初の自主技術を開発した。前者は1995年に、後者は1994年にそれぞれ実機を納入した。また、ガイドペーンの電動化は60 MW級水車へ、軸受の空冷化は30 MVA級発電機へと適用拡大を図っている。

In recent years, typical new technologies of pressure oilless, cooling waterless and brushless exciters have been applied to small and medium-sized hydroelectric power plant equipment, for the purpose of realizing simplified equipment, ease of maintenance, and environmental friendliness.

Among these activities, Toshiba has developed an electric servomotor for the runner blades of the Kaplan turbine and a PTFE thrust bearing metal as original technologies that are the first in the industry. These technologies were applied to projects in 1995 and 1994, respectively. Moreover, with regard to the already established technologies of an electric servomotor for guide vanes and air-cooled bearings, the applicable capacities have been expanded to 60 MW-class turbines and 30 MVA-class hydroelectric generators.

### 1 まえがき

水力発電設備は、他電源に比べ維持コストが優位であること、クリーンかつ自然の循環エネルギーを利用する電源であることから、ますますその重要性が高まり、新規開発と併せて既設発電所の近代化改修も推進されている。とりわけ中小水力発電設備においては、メンテナンスフリーおよびトータルコストパフォーマンスの向上が不可欠である。

このようなニーズを背景に、当社は“設備の合理化、保守の省力化”をキーコンセプトに、“3レス化技術”を中心に多種多様な技術を提供してきた。そのなかで、昨今の執筆すべき高度化技術について概要を紹介する。

### 2 ガイドベーン電動サーボモータの大容量化

水車のガイドベーンを操作する電動サーボモータは、水力発電所の補機の簡素化、保守の省力化、および建設・改修・運転コストの低減を目的として、中小水力を中心に普及してきた。当社でもすでに40台以上を納入している。この実績を踏まえ、水車出力30~60 MW級まで適用可能な電動サーボモータシステムを開発した。

#### 2.1 システム構成

水力発電所の電動サーボモータのシステム構成を図1に示す。

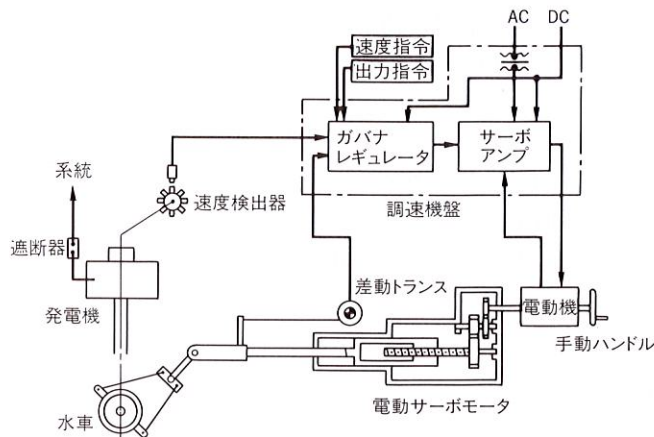


図1. 電動サーボモータシステムの概要 基本的なシステム構成例を示す。水車出力30~60 MW級まで適用できるようにした。

Configuration of electric servomotor system

#### 2.2 電動サーボモータの構造

電動サーボモータは、電動機、平歯車列からなる減速機構、ボールねじおよびボールナットからなる直線運動変換機構ならびに付属装置から構成され、電動機の回転がボールねじに伝わり、ねじロッドを前後にストロークする方式である。図2に電動サーボモータの構造を示す。

主な特長は次のとおりである。

- (1) ボールナット、ボールねじ、軸受などは高速、高頻

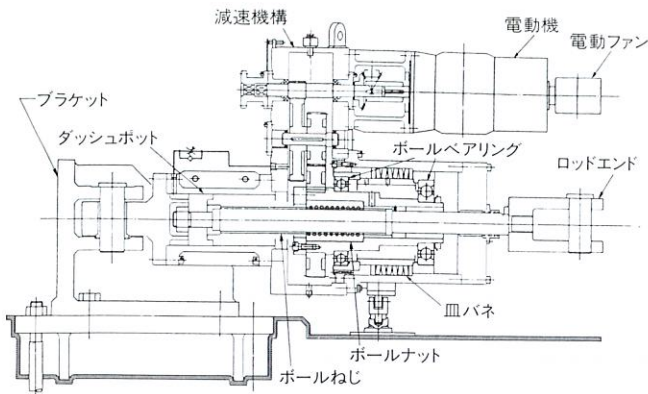


図2. 電動サーボモータの構造 オイルバスの潤滑方式により、ボールナット、ボールねじ、軸などは高速・高頻度使用に耐えられる。

Structural drawing of electric servomotor

度の使用に耐えられるようにオイルバスの潤滑方式を採用している。

- (2) ボールねじの軸端にダッシュポットを内蔵しているため、電源喪失時に水圧不平衡力による閉鎖力が作用しても、所定の時間で安全に閉鎖できる。

### 2.3 電動サーボモータの選定方法

出力 11 kW 以下の電動機は、制御が容易で加速トルクの大きい永久磁石式ブラシレス型同期電動機を、出力 15 kW 以上については構造が簡単で比較的発生トルクの大きい深みぞ型誘導電動機を採用し、最大出力 55 kW まで対応できる。

適用する電動サーボモータ容量を選定するに際しては、水車の形式、定格、ガイドベーン閉鎖時間、ガイドベーンの水力開閉モーメントなどから個別に設計する必要があるが、概略の目安をつける適用線図を図3に示す。

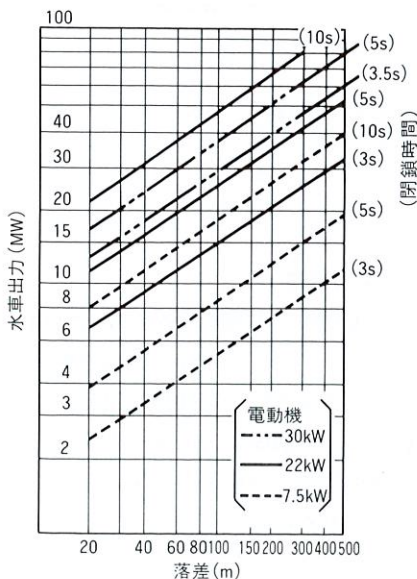


図3. フランシス水車用適用線図 電動サーボモータ容量を選定するときの概略の目安に用いる。閉鎖時間を変数に落差と水車出力を基準に示した。

Selection chart of electric servomotor for Francis turbine

### 2.4 二連式電動サーボモータシステム

電動サーボモータの適用範囲が拡大するに伴い、1台の電動サーボモータで駆動する従来の方式ではボールねじの制約から限界があった。その課題を克服するため、2台の電動サーボモータで駆動させる二連式を開発した。この方式によって 60 MW 級水車への適用も可能となった。二連式サーボモータの構成を図4に示す。

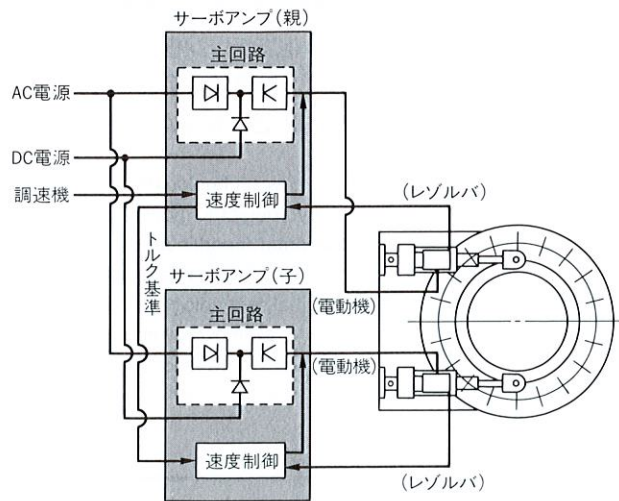


図4. 二連式電動サーボモータの構成 子側は親側からのトルク基準信号に追従させるマスタスレーブ方式である。

Configuration of dual-action type electric servomotor

## 3 カプラン水車ランナベーン電動サーボモータ

カプラン水車のランナベーン電動サーボモータシステムは、従来困難とされていたが、世界で初めて 4 MW 級立軸カプラン水車に適用した。

### 3.1 構造と特長

従来のランナベーン操作は、発電機上部に取り付けた圧油導入装置から主機回転部に配置したランナベーン油圧サーボモータに操作油を送り、ランナベーンの開閉操作を行っている。したがって、ランナベーンの開閉制御には、圧油タンク、圧油ポンプ、集油槽などで構成する圧油装置を必要とした。

これに対し、電動操作方式は発電機上部に取り付けた AC モータを駆動源とし、発電機軸に配置した遊星歯車機構で構成される差動装置、減速機、回転力を直線操作力に変換するボールねじ機構を組み合わせ、ランナベーンを開閉するものである。この基本構造を図5に示す。

### 3.2 動作説明

ランナベーン電動サーボモータシステムは、AC モータから主機の回転部に搭載した差動装置→減速機→ボールねじ

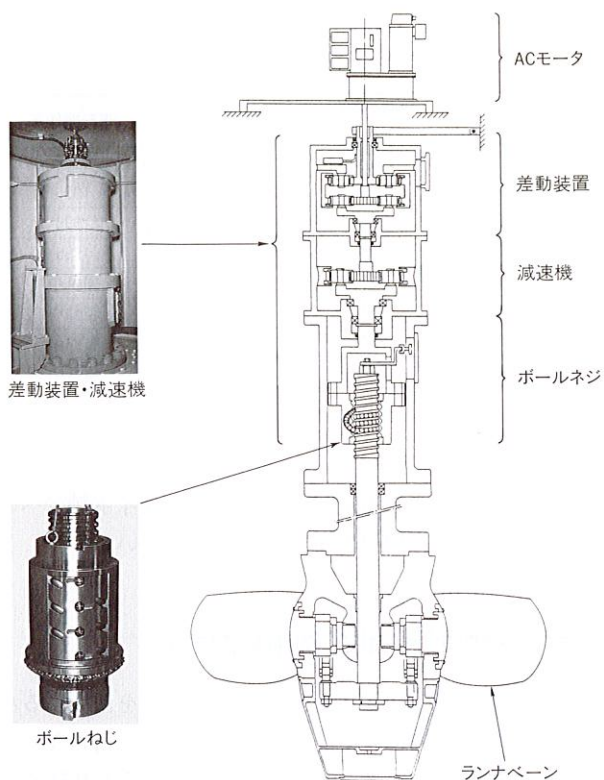


図5. ランナベーン電動サーボモータの基本構造 遊星歯車列を組み合わせ合わせた差動装置を用いて実用化した。  
Structure of electric servomotor for runner blades

→操作機構の順で操作力を与え、ランナベーンを開閉するシステムである。ランナベーンを操作するときにはACモータを回転させ、ランナベーンの開度を一定に保つにはACモータを停止させる。

このシステムの特長である差動装置は、主機の回転速度とは無関係にACモータから与えられる回転力を自在に減速機に伝達する機構である。主機の回転速度に関係なく回転力を伝える方式として遊星歯車列を組み合わせた機械同期方式を採用した。

減速機によって増力された回転力はボールねじで直線操作力に変換され、操作ロッド、リンク機構を介してランナベーンに伝達される。

### 3.3 納入例

ランナベーン電動サーボモータシステムは1990年から技術開発に着手し、60%縮小モデルでの性能検証、工場における実機回転試験による動作性能、制御性、応答性、耐久性の検証を経て、実機初適用として東京電力(株)中岩発電所に納入した。この発電所は1995年8月運転を開始し、順調に稼働している。主機の形式、定格は次のとおりである。

水車：立軸単輪単流渦巻カプラン水車(VK-1RS)

4,140 kW-16.36 m-29.0 m<sup>3</sup>/s-250 min<sup>-1</sup>

発電機：立軸回転界磁出口管通風型三相同期発電機

24 P-4, 200 kVA-250 min<sup>-1</sup>-11 kV-50 Hz-0.95 Pf

## 4 新素材スラスト軸受

立軸水車発電機には、回転部質量と水スラスト荷重を支えるためのスラスト軸受が装備されており、これにはテイルテイングパッド式すべり軸受が幅広く使用されている。スラスト軸受の静止板すべり面の材料には、従来はホワイトメタル(WJ2)を採用してきたが、これに代わってPTFE系材料を適用した新素材スラスト軸受を開発し、実機への適用を広げつつある。

### 4.1 新素材スラスト軸受の特長と効果

新素材スラスト軸受は、メンテナンスフリーや高性能化に寄与する多くの特長を備えている。

- (1) 耐摩耗性にすぐれ、長時間運転による軸受すべり面材料の摩耗量がWJ2材料に比べ格段に少ない。
- (2) 静止摩擦係数は0.05~0.08とWJ2の約1/3であり、始動トルクの低減および長期停止後始動時のジャッキアップ作業やオイルリフタ設備が不要である。
- (3) 高面圧化により軸受が小型化され低損失化ができる。
- (4) WJ2材のような金属粉の摩耗がなく、軸受潤滑油が汚損しない。
- (5) 万一、一部の静止板に損傷が生じてても他の静止板に損傷を与えない。
- (6) 台金に熱を伝えるにくいので、台金の熱変形がない。
- (7) すべり面材料自身が絶縁性をもっているため、軸絶縁に対する信頼性が高い。

### 4.2 新素材スラスト軸受の実機適用例

新素材スラスト軸受の適用実績(今後の適用予定を含む)を表1に示す。現在までに適用した3発電所計4台の水車発電機は順調に運転を続けている。

初適用機である下船渡発電所の発電機用軸受を図6に示す。この発電機のスラスト軸受に各種の監視センサを設置して約2年間で14,700時間の運転の結果、軸受温度は改修前の51°Cから34°Cに下がった状態で安定している。また、軸受点検の結果、頻繁な始動・停止と軸受荷重の変動にもかかわらず摩耗はなく、手入れや油交換は不必要であった。

次に納入した3発電所における始動トルクを測定した結果、発電機始動時の水車ガイドベーン開度は、新素材スラスト軸受を適用することにより1/2~1/3に小さくなっており、大幅な始動トルク低減効果が確認された。

### 4.3 今後の展望

新素材スラスト軸受は、現在のところ主に中小水力向け水車発電機に適用または適用計画しているが、今後、実績と改良を積み重ねながら適用範囲をさらに拡大する予定である。

表1. 新素材スラスト軸受の適用実績と適用計画

Reference list of thrust bearing made of new material

納入先		台数	形式	極数	容量 (kVA)	回転速度 (min <sup>-1</sup> )	スラスト荷重 (t)	運転開始年
東京電力(株)	下船渡	1	SG	16	7,000	375	71	1994
東京電力(株)	所野第一	1	SG	14	1,610	429	26	1995
北海道電力(株)	安足間	2	SG	20	6,000	300	95	1995
沖縄電力(株)	中城湾	1	FG	12	26,500	600	150	1996
東京電力(株)	土村第一	1	SG	14	6,950	429	62.4	据付中
東京電力(株)	信濃川	2	SG	28	39,000	214	309	製作中
関西電力(株)	祖山	1	SG	36	21,000	200	206	製作中
九州電力(株)	岩屋戸	1	SG	28	27,000	257	190	製作中

形式 SG：同期発電機, FG：フライホイール発電機

また、高面圧化に適したその特性から、将来は高速大容量機、さらには発電電動機への適用へ向けて、現在単機容量100 MVA級の発電電動機への実機適用を検討している。

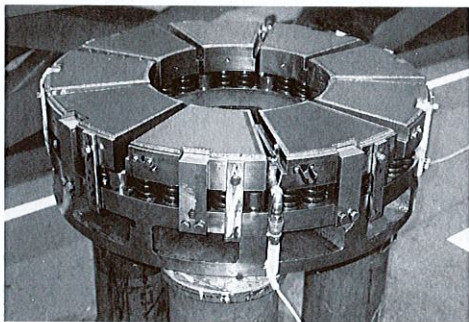


図6. 新素材スラスト軸受 初適用機として東京電力(株)下船渡発電所に納入した。

Thrust bearing made of new material

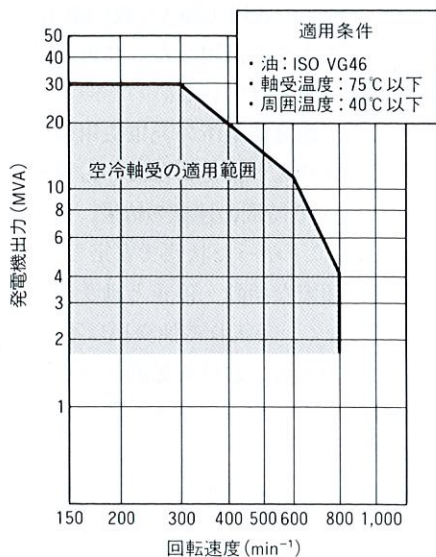


図7. 立軸発電機空冷軸受の適用範囲 油冷却器や軸受油槽の熱伝達の向上、および適正冷却風量の確保などにより、空冷軸受の適用範囲を拡大した。

Applicable range of air-cooled bearing for vertical generator

なお、回転軸の半径方向の荷重を支えるガイド軸受への適用についても現在開発および検証を進めている。

## 5 発電機軸受空冷化の適用範囲拡大

発電機の軸受の冷却媒体として河川水などを使用する水冷方式に代わり、給水装置を省略し、冷却水を用いない空冷方式が適用されつつある。今までは軸受損失が比較的小さい小容量・低速機への適用が主体であったが、空冷油冷却器の熱伝達の向上、軸受油槽に設けたフィンによる熱伝達の向上、適正冷却風量の確保などの開発・検討を進めてきた。その結果、現時点では図7に示す適用範囲へと拡大を図ってきた。今後は、前述の新素材スラスト軸受を適用することで高面圧化、高周速化による軸受損失低減が図れ、さらに高速、大容量機への適用拡大が期待できる。

## 6 あとがき

以上、当社の水力発電所高度化技術を紹介したが、今後とも、より合理化、省力化、無公害化に寄与できる技術と、建設コストや維持コストが低減できる技術の提供を旨として開発研究、実用化に努力していく所存である。



富安 久幸 Hisayuki Tomiyasu

京浜事業所水力機器部主査。  
水車制御機器の設計に従事。  
Keihin Product Operations



南波 聡 Satoshi Namba

京浜事業所発電機部。  
水力発電設備の発電機設計に従事。  
Keihin Product Operations



野村 克己 Katsumi Nomura

電力事業部水力プラント技術部主務。  
水力発電設備のシステムエンジニアリング業務に従事。  
Power System Div.