

# 水車・発電機の最新技術

Latest Technology for Hydraulic Turbines and Generators

塚本 直史 TSUKAMOTO Tadashi

高橋 正宏 TAKAHASHI Masahiro

藤井 恒彰 FUJII Tsuneaki

水車・発電機は、コスト低減や保守の簡素化に加え、環境に配慮した製品が望まれており、水車では、冷却水や操作油を不要にする水レス・油レスの技術開発が、発電機では補機省略と高速度化の技術開発が進められている。富士電機ではこれらに 대응するため、水車ではハイブリッドサーボをガイドベーン操作だけでなく、ランナベーンの開閉操作にも適用した。また、高速で大容量の水車発電電動機においては、回転子の強度解析技術、可変剛性型防振システム、ならびに補機の省略のための高速機向けスラスト軸受自己循環ポンプシステムを開発し、適用した。

For hydraulic turbines and generators, power companies seek products developed for cost reduction, ease of maintenance and low environmental impact. Advanced are being made in the development of water-free and oil-free technologies, which make cooling water and operation oil unnecessary, for hydraulic turbines and the development of technologies for reducing auxiliary machinery and increasing the speed of generators. In response to this, Fuji Electric has applied hybrid servo motors to opening and closing operation of runner vanes as well as guide vanes in hydraulic turbines. We have now expanded the scope of application to include runner blade divergence operation. Also, for high-speed, high-capacity hydraulic turbine generator motors, we have developed and applied strength-analysis technology for rotors, a variable-stiffness vibration control system, and a thrust bearing self-circulation pump system for high-speed generator motors to reduce auxiliary machinery.

## 1 まえがき

2011年の東日本大震災以降、原子力発電の代替エネルギーとして、再生可能エネルギーが脚光を浴びてきている。さらに「再生可能エネルギーの固定価格買取制度」により、再生可能エネルギーの開発が加速されている。水力発電は安定した電源を確保できる発電方式であり、一般水力発電にはベース負荷としての期待が、揚水発電には再生可能エネルギーの増加に対する系統平準化技術としての期待が高まっている。

富士電機は、フォイト社と水力発電分野で協力をするため、富士・フォイトハイドロを設立し、各種新技術の開発に積極的かつ継続的に取り組んでいる。また、揚水発電についてもフォイトグループの技術をベースに開発に取り組んでいる。

## 2 最近の技術動向

これまで、コスト低減、保守の簡素化および環境への配慮の観点から冷却水などを不要にする水レスの技術と操作油などを不要にする油レスの技術が開発され、適用されてきた。最近では、次の新技術が導入されつつある。

- (a) ガイドベーン用ハイブリッドサーボの適用範囲の拡大
- (b) ハイブリッドサーボによる可動羽根水車ランナの電動化
- (c) 新素材の採用による水潤滑軸受の適用範囲の拡大

また、最近では流れ解析技術により、水車ランナの性能の予測精度が向上し、高性能のランナが開発が可能である。さらに、この技術により、既存の水車ランナの改造による性能向上も容易に予測できるようになり、出力増を目的と

したランナの更新が増加している。

一方、発電機においては、解析技術の進歩により、強度解析に加え振動解析などが精度良く行われるようになり、設計における信頼性が向上している。

## 3 水車の技術

### 3.1 ハイブリッドサーボ

国内の主な中小水力発電所のガバナにおいて、ガイドベーンを開閉操作する油圧操作式サーボモータに替わり、電動操作式サーボモータが採用されている。これは、保守が簡素化できるなど、電動操作式の優位性が広く認められたからにほかならない。しかしながら、電動操作式は、油圧操作式に比べて必要な操作力やガイドベーン閉鎖速度の面で劣っている。また、電動操作式はサーボの機械操作部に損傷が発生した場合、復旧に時間がかかるため、発電所の停止期間が長くなるという課題がある。これらの課題を解決するため、新しいタイプの電動操作式サーボモータの開発要求が高まっていた。

このような背景から、富士・フォイトハイドロでは早くからハイブリッドサーボの開発を行ってきた。これは、油圧操作式に対する電動操作式のメリットを継承しつつ、さらに大容量の発電所に適用することができ、従来の電動操作式サーボの弱点も補う新世代ガバナシステムである。

ハイブリッドサーボは、電動操作式サーボモータにより油圧シリンダを制御するシステムであり、これまでに数多くの発電所へ適用してきた。適用した実績には、ガイドベーンの開鎖速度が非常に速く、電動操作式サーボモータが採用できなかった制圧機付きフランシス水車の改修プロジェクトも含まれる。

### 3.2 ランナベーン開閉操作

カプラン水車や斜流水車などの可動羽根水車は、広範囲な流量で高効率な運転が可能である。山形県企業局の横川発電所と新野川第一発電所に納入した斜流水車では、ガイドベーンとともにランナベーンの開閉操作にもハイブリッドサーボモータを採用した。両発電所の仕様を表1に示す。

図1に、横川発電所（立軸斜流水車）のランナベーン開閉操作用ハイブリッドサーボモータを示す。最上部にはサーボモータを取り付けており、その下の円筒部にポンプユニットなどを収納している。なお、シリンダは水車軸内に設置している。

ランナベーン開閉操作のハイブリッド化は、図2に示す主機回転同期制御システムによって実現している。このシ

表1 水車の仕様

項目	横川発電所	新野川第一発電所
型式	VD-1RS	VD-1RS
出力	6,500 kW	10,500 kW
基準有効落差	57.0 m	99.8 m
回転速度	500 min <sup>-1</sup>	600 min <sup>-1</sup>



図1 ランナベーン開閉操作用ハイブリッドサーボモータ

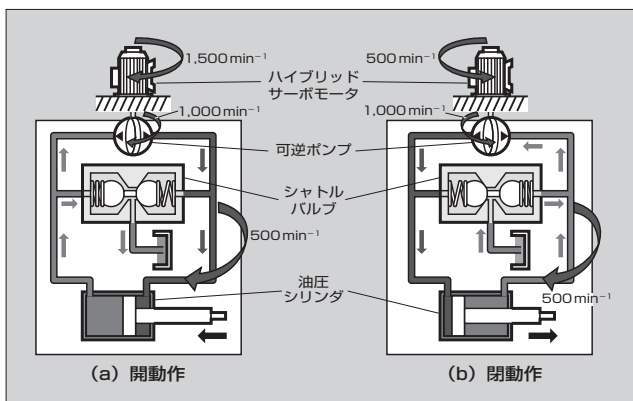


図2 ランナベーンのハイブリッド化  
(主機回転同期制御システム)

ステムでは、ランナベーン駆動モータは発電機上部の静止部に設置されており、可逆ポンプやシャトルバルブなどのポンプユニットと油圧シリンダが発電機軸と水車軸の回転体内部（図2 枠内）に設けられている。

ランナベーン開閉操作は、駆動ポンプと主軸の相対的な回転速度を制御することによって油圧シリンダ内の圧力を調整することで行われる。

(a) ランナベーンの開閉動作を停止する場合

駆動モータと主軸とを同じ速度で回転させることで、駆動ポンプを相対的に停止状態にする。

(b) ランナベーンの開動作を行う場合

駆動モータを主機と同じ方向で、主軸より速い回転速度に制御する。これにより、駆動ポンプと主軸との回転速度差によるポンプ効果で油圧シリンダ内に圧力差が生じ、ベーン操作ロッドを動作させている。主機定格回転速度が 500 min<sup>-1</sup> であれば、駆動モータを 1,500 min<sup>-1</sup> で正回転させることで、駆動ポンプは相対的に 1,000 min<sup>-1</sup> で正回転する。

(c) ランナベーンの開動作を行う場合

駆動モータを主機と逆方向に回転させる。その結果、回転部に設置された駆動ポンプは、主機と逆方向に回転し、開動作時と逆方向の圧力差が油圧シリンダ内に生じる。主機定格回転速度が 500 min<sup>-1</sup> であれば駆動モータを 500 min<sup>-1</sup> で逆回転し、駆動ポンプは相対的に 1,000 min<sup>-1</sup> で逆回転する。

この主機回転同期制御システムでは、通常の起動停止や非常時の急停止などを含めて、常に主機の回転速度の変動に応じて駆動モータの回転速度を制御し、指令されたランナベーン開度に制御した。

## 4 発電機の技術

富士・フォイトハイドロは、大容量揚水発電所である南アフリカ共和国・Eskom 社イングラ発電所の発電電動機（373 MVA, 50 Hz, 428.6 min<sup>-1</sup>）を 2008 年に受注し、2013 年の据付け開始に向けて製作を進めている。

本発電電動機に採用した磁極およびリムの強度解析技術や高速大容量向け磁極巻線などの基礎的な技術、ならびに可変剛性型防振システムや高速大容量スラスト軸受自己循環ポンプシステムなどの特殊な技術を中心に、水車発電機技術について述べる。図3にイングラ発電所の発電電動機の断面を示す。

### 4.1 回転子の設計技術

(1) 回転子設計の要求事項

揚水発電所は、電力ピーク時の負荷対応が主な目的であるため、運転の特徴として、起動停止が頻繁に繰り返されることが挙げられる。揚水機は、一般的に落差が高いため高速に回転することが多く、回転子には高速回転による高い遠心力と温度上昇が生じる。さらに、頻繁な起動停止によって、遠心力と熱による繰り返し応力が生じる。そのた

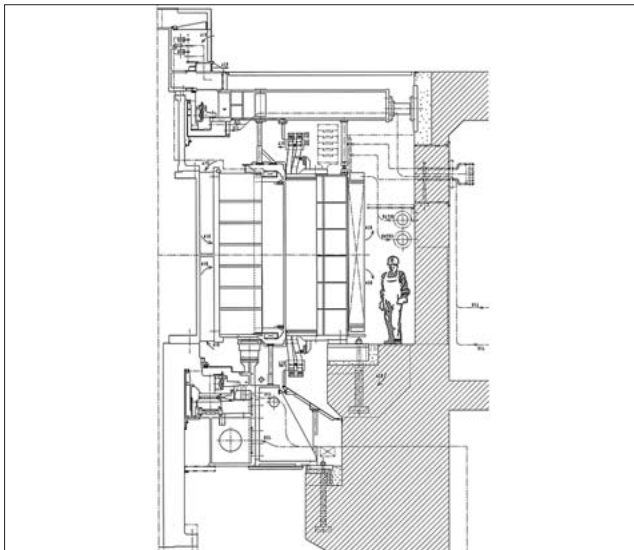


図3 イングラ発電所向け発電電動機の断面

め、疲労強度や熱応力・熱変形に耐える構造設計を行うことが重要である。

#### (2) 磁極と回転子リムの設計

遠心力は回転数の二乗に比例する。特に磁極と回転子リムの接合部や高応力部には、起動停止が繰り返されるごとに外部荷重による極めて高い応力が繰り返して作用する。また、形状が大きく変化する部分には高い応力が集中する。このような部位については、低サイクル疲労および高サイクル疲労の十分な寿命評価に基づいて構造を決定する必要がある。

図4に、イングラ発電所向け発電電動機の磁極およびリムの応力解析結果を示す。磁極のリムへの取り付け部やリムの磁極支え部は、応力の集中を避ける形状とした。

#### (3) 磁極巻線の設計

磁極巻線においては、繰り返し発生する熱応力・熱変形に対して考慮する必要がある。界磁巻線は、運転中に作用する遠心力により、界磁巻線の外周部にある絶縁フランジに押し付けられる。この状態で電流が流れると、界磁巻線は温められ熱膨張が起きる。

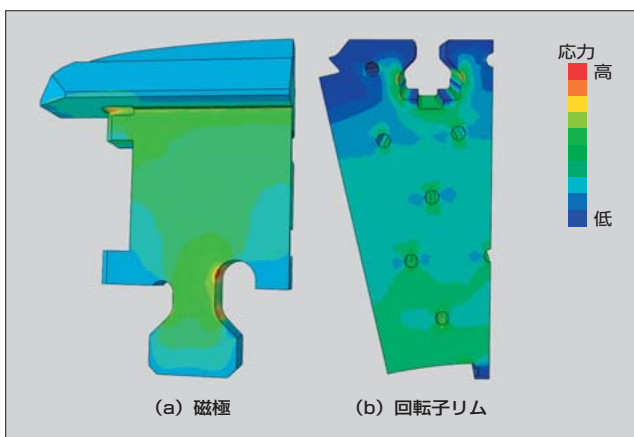


図4 イングラ発電所向け発電電動機の磁極および回転子リムの応力解析

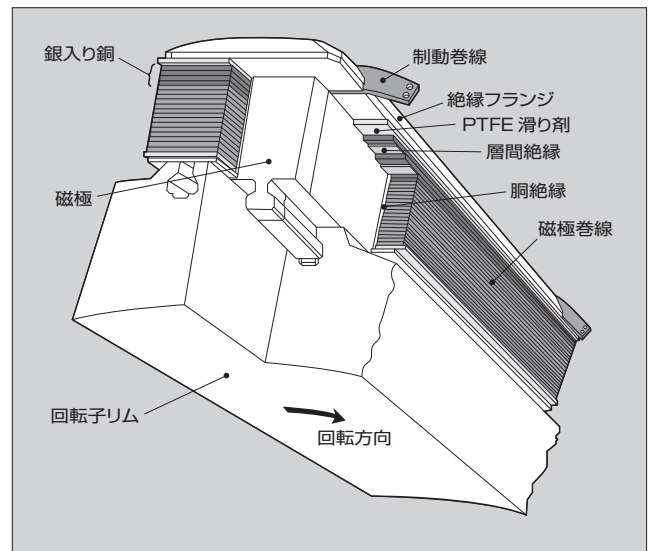


図5 イングラ発電所向け発電電動機の磁極巻線の構成

遠心力による力と熱膨張による力は方向が異なるため、この相互関係は、絶縁板と界磁巻線間の摩擦係数によりバランスを取る。遠心力は、絶縁フランジと界磁巻線間の摩擦係数により、熱膨張の伸びを妨げる力となる。この伸びを妨げる力と熱膨張による力の差が界磁巻線に加わり、界磁巻線の内部に圧縮応力となり蓄積する。一般的に界磁巻線に使用されている銅板は、クリープ特性が悪く、内部に蓄積した圧縮応力は運転中に緩和してしまう。一方、停止時には、クリープにより圧縮応力が緩和した場合、磁極巻線は熱収縮を起こす。そのため、磁極巻線には起動停止ごとに引張応力が発生し、最悪の場合には、切断してしまう。

図5に、イングラ発電所の磁極巻線の構成を示す。同機は大容量高速機であり、磁極巻線の軸方向長さが長いいため熱膨張量が大きく、高速機であるため遠心力が大きい。加えて、揚水機であるため起動停止の頻度も極めて高い。これらのことから磁極巻線の設計において、外周側の巻線にクリープ特性に優れた銀入り銅を使用した。

## 4.2 防振ビームシステム

### (1) 防振ビーム設計の要求事項

高速大容量機では、多くの場合、トルクに対する軸の剛性を十分持たせており、軸系の剛性は軸を支持する構造物の剛性に支配される。特に、発電電動機の上軸受については、軸系の危険速度を上げるため、基礎コンクリートとの間に防振ビームを配置して支持剛性を向上させることが多い。

防振ビームの設計は、防振ビームの熱膨張を考慮しなければならない。運転中は、発電機室の内部は温度が上昇し、発電機の各部に熱膨張が起きる。一方、コンクリート基礎は、発電機の運転中もほとんど熱膨張が起きないため、両者の間には無視できない変位差が発生し、防振ビームには変位差に相当する大きな内部荷重が発生する。この荷重のため、軸受が軸受隙間以上に収縮することで、軸受の焼付けやコンクリート基礎が破損する事例が報告されている。



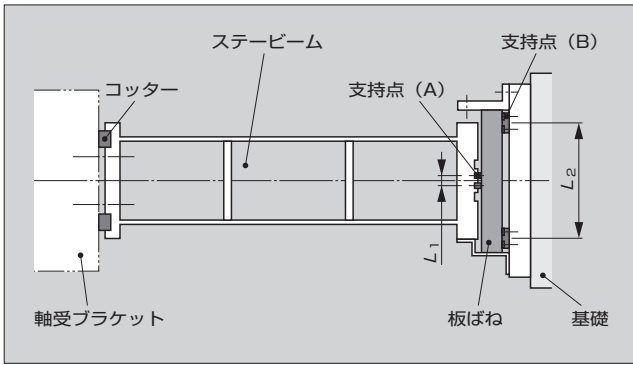


図6 固定剛性型防振ビームシステム

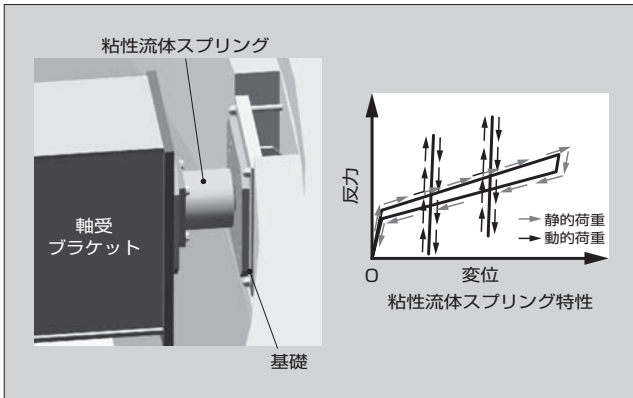


図7 イングラ発電所向け可変剛性型防振ビームシステム

これらの事例に対処するためには、内部荷重を構造的に緩和する方が必要になる。

(2) 固定剛性型防振ビームシステム

図6に、板バネを使用した従来型の固定剛性型防振ビームシステムを示す。この構造は、内部荷重を緩和しつつ振動に対する必要剛性を確保するために開発したものである。支持点(A)、(B)の位置を適切にすることで防振ビームの剛性値が最適になるように設計するが、熱膨張に対しても振動力に対しても同じ値である。

(3) 可変剛性型防振システム

イングラ発電所向けに採用した新型の可変剛性型防振システムを図7に示す。粘性流体スプリングは、熱膨張や熱収縮のようなゆっくりした変位に対しては内部荷重をほとんど発生させることなく追従し、振動荷重のような比較的高周波の荷重に対しては高い剛性を示す。よって、本システムは熱膨張による軸受隙間の減少やコンクリート基礎への高荷重を防ぎつつ、軸系には高い支持剛性を発揮する。

本システムは、既に複数の適用実績があり、良好な結果が報告されている。

4.3 高速大容量スラスト軸受自己循環ポンプシステム

軸受潤滑油システムは、軸の回転による遠心力を利用した自己循環ポンプシステムと、外部にポンプシステムを置いた強制給油システムに大別される。一般的には、付属機器の配置スペースやメンテナンスを考えると自己循環ポンプシステムの適用が望ましい。しかし、軸回転部の周速度

が高いと、軸のポンプ穴入口部が油面から空気を吸い込み、ポンプ作用が著しく低下する。このため、従来は、40 m/s 近辺を目安として適用限界を定めてきた。

富士電機および富士・フォイトハイドロでは、自己循環ポンプシステムの適用限界を引き上げるため、実機大の実験装置(図8)を製作し、新システムを開発した。この実験装置は、ポンプの吸い込み性能および吐出時の圧力損失を改善するとともに、軸受回転部の周速度が70 m/s まで適用可能なシステムである。

イングラ発電所は軸受回転部の周速が58 m/s であり、



図8 70 m/s 級自己循環ポンプ実験装置

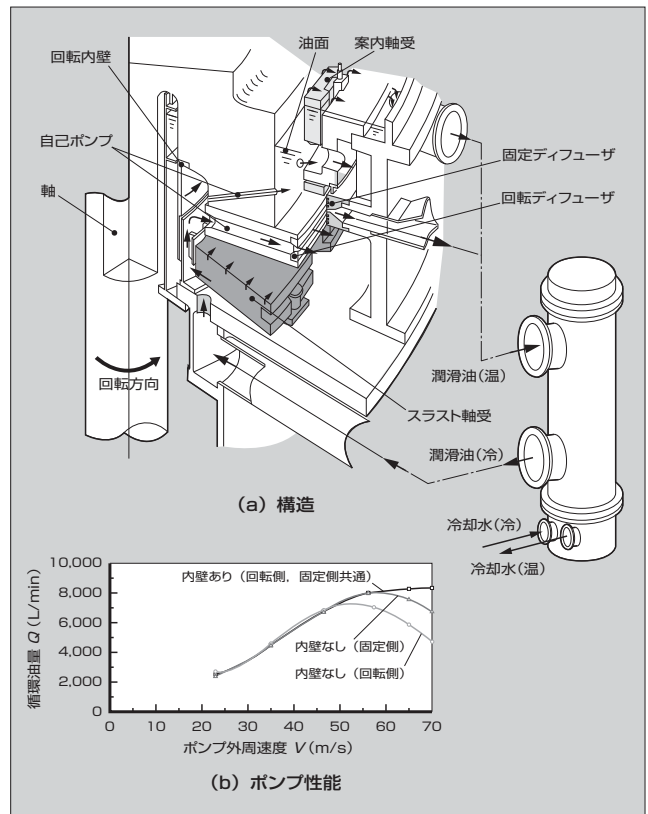


図9 イングラ発電所向け自己循環ポンプシステムの構成

本システムの適用を提案し、採用された（図9）。

## 5 あとがき

水車・発電機の最新技術について述べた。これらの技術は、水力発電全般に適用できるものであり、機器の特徴に応じた効果的な適用を行っていく。

今後も、新技術の開発を積極的に推進し、水力発電の発展に貢献していく所存である。

## 参考文献

- (1) 早馬弘ほか. ハイブリッドサーボシステム. 富士時報. 2003, vol.76, no.9, p.572-576.
- (2) 早馬弘, 藤井恒彰. 最新の水車技術と適用事例. 富士時報. 2008, vol.81, no.5, p.335-340.
- (3) 氏家隆一ほか. 揚水発電向け発電電動機の技術. 富士時報. 2008, vol.81, no.5, p.341-346.



### 塚本 直史

水車の開発・計画・設計に従事。現在、富士・フォイトハイドロ株式会社設計部長。工学博士。ターボ機械協会会員。



### 高橋 正宏

水力発電所のエンジニアリング業務に従事。現在、富士・フォイトハイドロ株式会社技術部長。電気学会正員。



### 藤井 恒彰

水車および発電機の開発・設計に従事。現在、富士・フォイトハイドロ株式会社設計部マネージャー。工学博士。日本機械学会会員、ターボ機械協会会員。





\*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。