

発生電力量の増大に向けて

Toward Increased Power Generation Output with Same Water Power

手塚 光太郎

TEZUKA Kotaro

南波 聡

NAMBA Satoshi

野口 哲哉

NOGUCHI Tetsuya

水力発電は自然エネルギーを利用するもっとも効率の良い発電システムであり、古くから電源として利用されてきている。既存の水力発電所が持つ潜在的な可能性を引き出すことは、エネルギーの有効利用につながり、環境保全に役立つ。水車及び発電機の性能向上技術と運用効率向上運転により、同じエネルギーを利用しながらも発生電力量を大幅に増大させることができる。

Hydroelectric power is the most effective generating system using natural energy and has a long history of use. Drawing out the latent potential of existing power plants leads to more effective use of energy resources and contributes to environmental preservation. Recent design technologies for hydraulic turbines and generators to improve their performance, as well as optimal distribution control, can enable aging plants to generate more electricity than other plants with the same water power.

1 まえがき

水力発電は、わが国で100年以上も昔から電源として利用されてきている。この間、時代の変遷とともにその役割は変化しているが、純国産・クリーン・再生可能なエネルギーとして活用されてきている。近年には、初期の老朽化した水力発電設備をリニューアルする機会に最新の技術を導入することで、同じ水力エネルギーを利用しながらも、発生電力量を大幅に増大するリパワリングが行われている。

ここでは、古くて新しい水力発電として、発生電力量の増大を通してエネルギーの有効活用を果たす最新技術について述べる。

2 水車の性能向上技術

2.1 性能向上の意義

一般に性能向上ということには、研究開発により水力性能レベル自体を向上させることと、既設発電所のリパワリングを通じて性能改善することの二つの意味合いがある。前者は水車メーカーの技術の中核を成すものであり、水車メーカーとして、常に研究開発に取り組んでいる。一方、後者は前者の成果である最新設計技術を適用した結果であり、既設発電所が持つ潜在的な可能性を引き出すことができる。リパワリングでは既存の土木設備を利用できることから、発電所を新設する場合と比較して投資費用は少なく抑えられ、その経済効果も大きい。特に、既設発電所の運用状況に応じた設計を行えば、運転頻度が高い運転領域での効率を優

先して向上させることで、発生電力量を増大できる。

キャピテーション特性や水圧脈動特性の向上も、運転範囲拡大という観点で効率向上と同様に重要である。キャピテーションや水圧脈動は不安定流動現象であり、設計点を大きく離れた運転点での影響が大きいため、これらの性能を向上させることは、下限出力の拡大など運転可能範囲の拡大につながり、発生電力量を増大できる。

2.2 性能向上施策

水車の場合、運転状態が良好な設計点付近での運転に限定されてはならず、むしろ電力需要変動への即応性に優れるという特長を生かすために、出力の小さな部分負荷運転の頻度も高い。したがって、非設計点においても、ランナ内の二次流れ損失や吸出し管内でエネルギーとして回復されない渦廃棄損失を抑制した水車が望まれている。このような機器の開発は、長い水車の歴史の中でも永遠のテーマとなっているが、近年、これを実現するために、新しい構造を持つものや新しい設計思想に基づくものが開発及び実用化されてきている。

新しい構造の例としては、長翼と短翼を周方向に交互に配置したスプリッターランナがある(図1)。スプリッターランナでは、短翼による長翼流路間の整流効果と、両翼の合計枚数の増加による翼1枚当たりの翼負荷の減少によって、部分負荷領域や低落差領域で発生する二次流れ損失と不安定流れを抑制することができ、優れた変落差・変流量特性を示す。また羽根枚数の増加は、強度や振動面でも有利であり、高い信頼性を備えることになる。このようなスプリッターランナはポンプ水車へも適用されている。

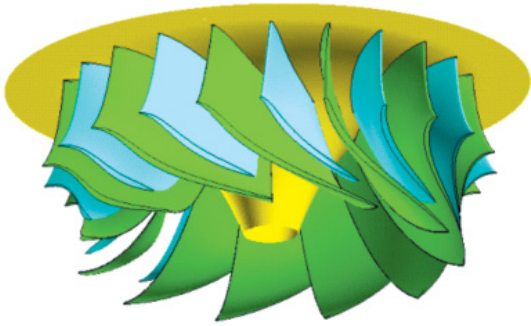


図1 . フランス水車スプリッターランナ - 長翼と短翼を周方向に交互に配置した新構造のランナであり,優れた変落差・変流量特性を持つ。
Francis turbine splitter runner

図2はポンプ水車ランナ内の部分負荷運転時における流線を示すものであるが,既設ランナでは羽根入口部で大きな剥離(はくり)が生じた不安定な流れになっているのに対して,スプリッターランナでは剥離が抑制されていることがわかる。また,ポンプ低揚程運転でのポンプ入口の羽根面圧力分布の比較を図3に示す。スプリッターランナでは,羽根圧力面での局所的圧力低下が緩和されていることがわかる。

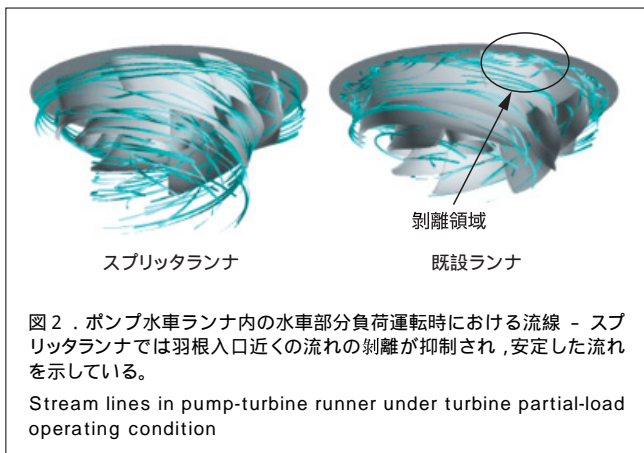


図2 . ポンプ水車ランナ内の水車部分負荷運転時における流線 - スプリッターランナでは羽根入口近くの流れの剥離が抑制され,安定した流れを示している。
Stream lines in pump-turbine runner under turbine partial-load operating condition

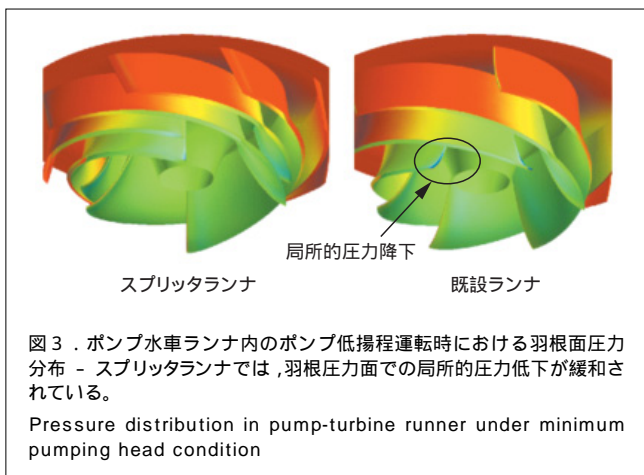


図3 . ポンプ水車ランナ内のポンプ低揚程運転時における羽根面圧力分布 - スプリッターランナでは,羽根圧力面での局所的圧力低下が緩和されている。
Pressure distribution in pump-turbine runner under minimum pumping head condition

模型試験による水車性能の比較例を図4に示す。スプリッターランナでは運転範囲全域で効率が向上しており,特に部分負荷効率の向上が顕著である。

新しい設計手法としては,目標とするフローパターンを与えてこれを実現する翼形状を創成する逆解法や,遺伝的アルゴリズムなどを適用した繰返し計算による数理的最適解探求法などがある。いずれも,古典的な準三次元設計理論では無視されていた流れの三次元性を考慮したものであり,次節で述べる流体解析技術がその根幹を成している。

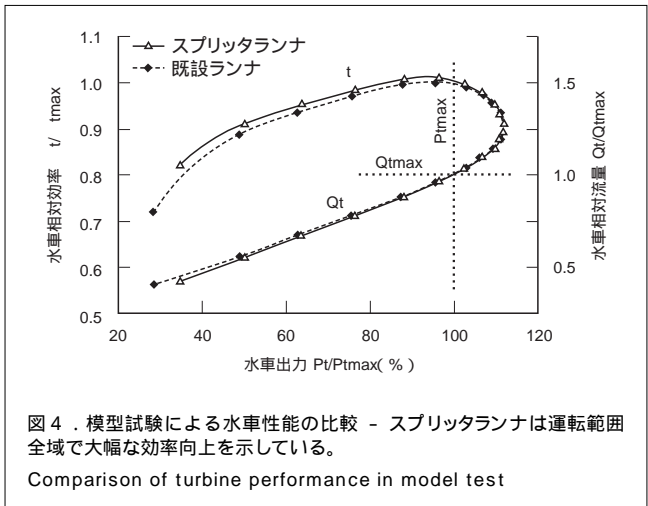


図4 . 模型試験による水車性能の比較 - スプリッターランナは運転範囲全域で大幅な効率向上を示している。
Comparison of turbine performance in model test

2.3 流体解析技術

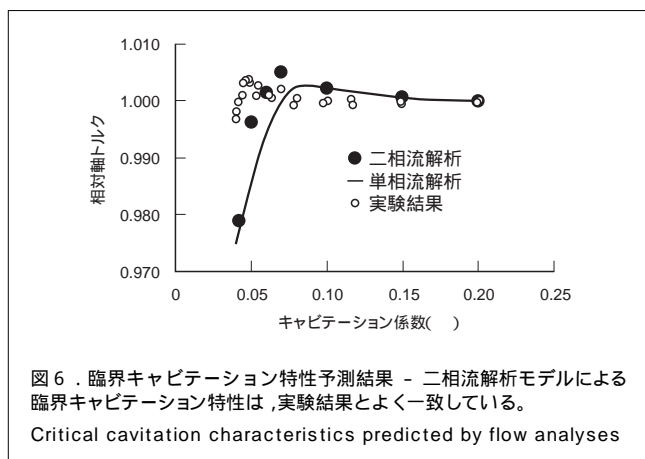
水車設計では,水車自体が長い歴史を持つことから経験的な設計手法があり,基本的にはこれに基づいた設計を行えば大きな問題は起こりえない。しかし,近年のように性能向上メリットを経済評価されるようになると,厳密な性能評価が必要となることに加え,従来のように最適化までに多くの費用と時間を費やして,多数の模型を製作して模型試験検証する方法では不経済となり,コンピュータによる流路内の流れのシミュレーション(流体解析:CFD(Computational Fluid Dynamics))が重要技術となってくる。CFD技術は,昨今におけるコンピュータ技術の飛躍的な発展を背景に,水車設計においてはもはや不可欠のものとなっている。更に,将来的には模型試験の代替として,流体解析のみで水力性能を検証するバーチャルモデルテストの構築へ移行していくと予想されるが,そのためには効率,キャビテーション,水圧脈動など,すべての水力性能を高精度で予測する解析手法の開発と確立が必要である。ここでは,まだ研究段階ではあるものの,これらへの足がかりとなるCFD適用事例について述べる。

図5は,ケーシング入口から吸出し管出口までを一体にモデル化した解析例である。各流路間での物理量の境界条件の受け渡しに仮定を設ける必要がないうえ,互いの干渉作

用が考慮されて実際の流れを模擬することができる。このことから、特に部分負荷領域などの非設計点における性能予測精度が改善される。

水などの液体の圧力がその時の飽和蒸気圧以下になると、蒸発による相変化でキャビテーションが発生するが、キャビテーションは気泡であるため、この挙動を詳細にシミュレーションするには気液二相流モデルによる取扱いが必要となる。一例として、フランス水車の臨界キャビテーション特性の予測結果を図6に示す。二相流解析では、トルクが低下し始める点が実験結果と比較的によく一致していることがわかる。

以上のCFD事例は、解析メッシュ数の増加や高度な計算モデルの採用により、膨大な計算時間を要するという欠点がある

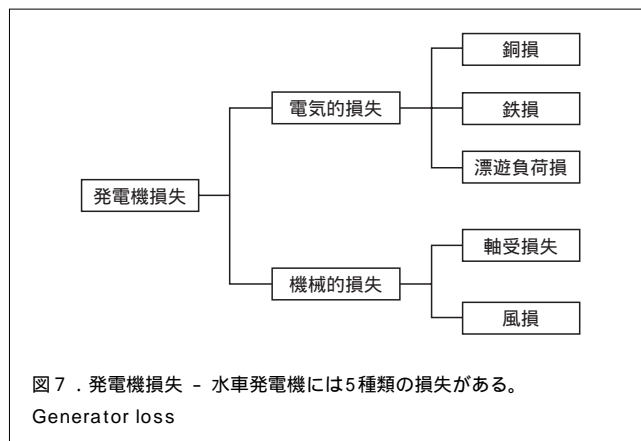


あるため、現状では設計ツールとしての利用にまでは至っていない。計算時間を短縮して実用化を図っていくことが今後の課題となる。

3 水車発電機の性能向上技術

水車発電機においても、効率向上は発生電力量の増大につながるが、このためには発生する損失を低減し、出力をより有効に活用することが必要となっている。

水車発電機で発生する損失を大きく分けると電氣的損失と機械的損失があり、それぞれの内訳を図7に示す。



これまでに、新技術の適用、解析精度の向上などの施策により各々の損失低減を図ってきており、最近の損失低減に関する技術とその効果を述べる。

3.1 風損の低減

水車発電機の冷却は、回転子自身の回転によるファン効果を利用し、空気を流して鉄心やコイルを冷却するラジアル通風方式が主流となっている(図8)。

風損低減に向けては、鉄心やコイルの冷却に必要な風量を効果的な通風路にて流すことが重要であり、回転子リムから磁極間を通過した冷却空気が、エアギャップを介して固定子鉄心部を軸方向に均等な風量分布で流れる状態が最適である。このため、磁極間の構造を見直し、上述の設計で意図した通風路から漏れる流量を極力小さくすることで風損を低減している。

また、固定子コイル温度を鉄心へ、若しくは直接冷却空気へ伝達するための熱伝達率を向上させ、必要冷却風量を低減して風損低減を図っている。風損低減は、水車発電機効率の向上だけでなく、空気冷却器の小容量化、冷却水量の低減など資源の有効利用にも寄与する。

3.2 軸受損失の低減

スラスト軸受においては、回転軸の軸受面側に設けている回転板を省略し、外径寸法を縮小することで、軸受損失を

4 制御での運用効率向上

次に、制御方法により運用効率を向上させる例を示す。

流れ込み式の発電所では、上流から流入する水量に応じた運転を行うことから、主機の運転停止を水槽水位で判断する応水制御と、水槽水位に応じて負荷調整する水位調整制御(以下、水調と呼ぶ)を適用している場合が多い。

応水制御では、水槽水位が起動水位以上になると運転を開始し、停止水位以下になると停止する運転制御が一般的に行われている。これは、運転開始時に水槽水位が高くても上流からの流入量が少ないと、有効な発電運転を行えないうちに停止させる結果になってしまうことがあり、このような運転停止を防止することでトータルの発生電力量を増加させることができる。

また、水調運転は水槽水位を検出して水槽への流入量＝使用水量となるように負荷調整制御を行う。これは、上流からの流入量が急変した場合に水槽からの溢水(いっすい)を防止する観点から、ある程度裕度のある低い水位を基準水位として設定しているため、理想状態より低い水位での常時運転となり、同じ水量でも理想状態より発生電力は少なくなる。“出力 水位×水量”であるので、発生電力量増大に向けては、できるだけ高い水槽水位での運転が理想であるが、一般には上流からの流入量の把握には、伝送装置や水位計・流量計などに要する経済的理由により取り込んでいない場合が多い。

ダム式の発電所で水位計画運転を行う運用では、使用水量を決定しこれを用いた発電を行っている。一つの発電所に複数台(ここでは2台)の水車を備える場合には、使用水量が1台運転での最大流量以上のときには2台運転を行う。この際には、2台の主機が同規模の容量の場合は均等流量運転していることが多いが、機器の保全履歴などによっては2台の効率特性が各々異なっている場合がある。このため、複数台運転時に使用するトータル流量が同じでも、個々の使用流量の組合せにより発生電力に数%程度の差異が発生する場合もある。このような場合には、複数台の水車のトータル効率を最大とする高効率運転制御を適用することで、発生電力量を増加させることができる。高効率運転制御の適用例として、2台運転する際の流量分担によって生じうる最大の出力差と、均等流量運転をした場合に対して流量分担の最適組合せにより増大できた出力増分を図9に示す。

このような効果を実現するためには上流情報が不可欠であり、従来は水系の各種情報を取り込んで処理するために、大規模な制御システムを必要としていたため、小容量の発電所への適用は経済的に困難と考えられていた。

ユビキタス時代の到来により、今後は水位計や流量計などのインテリジェント化が進み、安価に情報発信が行えるよう

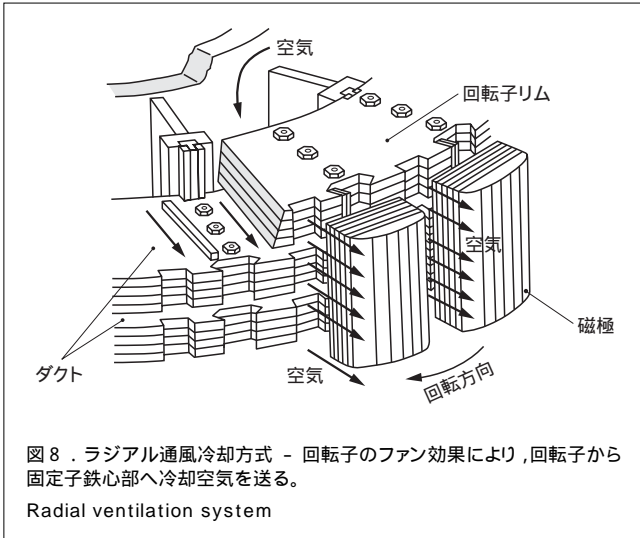


図8．ラジアル通風冷却方式 - 回転子のファン効果により、回転子から固定子鉄心部へ冷却空気を送る。
Radial ventilation system

大きく低減できる。また、油槽内油温の高温化の採用も損失低減には効果的である。

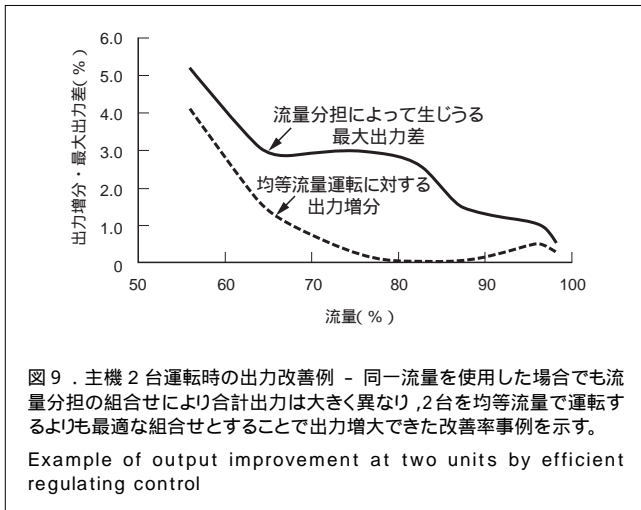
しかし、これらは軸受の信頼性を損ねる要因と考えられていたため、これまで採用される機会は少なかったが、近年において適用が進んでいる樹脂スラスト軸受は、その摩擦・摩耗特性が優れている特長から、軸受としての信頼性を損うことなく高面圧化、油槽内油温の高温化を実現できる。横軸ジャーナル軸受においても、樹脂軸受化により高面圧化ができ軸受損失が低減される。

軸受損失低減は、そのまま発生電力量の増加に寄与するが、これと併せて注目すべきは、軸受冷却方式を従来の水冷式から空冷式に変更可能な範囲が拡大することである。この冷却水レス化により、給水設備の省略やその動力となる消費電力を低減できる。また、始動・停止時の、軸受すべり面に形成される油膜厚さが薄い状態で、すべり面の摩耗を防止するために設けられたオイルリフターが、樹脂スラスト軸受では、耐摩耗性から必要始動トルクさえ確保できれば不要となり、オイルリフター設備の省略やその動力となる消費電力が低減できる。

3.3 電気的損失の低減

電気的損失低減のためにも損失ごとの施策がなされており、鉄損については、固定子鉄心材料の見直しや低磁束密度化するなどして損失低減を図っている。銅損については、低電流密度化などを通じて大きな損失低減を実現しているが、界磁電流算出プログラムの見直しによる解析精度向上により、更に損失低減ができると考える。

電気的損失は発電機的全損失の半分以上を占めるため、その損失低減は、発電機の性能向上に大きく寄与するものである。



になると, 今まで経済的理由により見送られていた容量の小さな発電所に対しても, 上流情報を用いた高度な応水制御, 水調, 高効率制御が適用できるようになり, 発生電力量が増加できるようになると期待される。

5 あとがき

水力発電は, 長い歴史を持つため古くと考えられがちであるが, 純国産・クリーン・再生可能という特長を備え, 現在活用されている自然エネルギーの中でも, もっとも効率の良い発電システムである。今後とも最新技術を通じて, この水力発電の持つ潜在能力をより大きなものへと引き出していきたい。

文献

- (1) 松本貴與志, ほか . 既設揚水発電所ポンプ水車のリニューアル . 東芝レビュー . 57, 9, 2002, p.58 - 61 .
- (2) 田口 忠, ほか . ポンプ水車スプリッターランナの開発 . ターボ機械 . 29, 12, 2001, p.736 - 744 .
- (3) 黒沢貞男, ほか . 軸流水車ランナの臨界キャビテーション特性の予測 . ターボ機械 . 30, 5, 2002, p.307 - 311 .
- (4) 稲垣泰造, ほか . 水車発電機器改修におけるライフサイクルコンセプト . 東芝レビュー . 54, 12, 1999, p.44 - 48 .
- (5) 久保田一正, ほか . 揚水発電所向け発電電動機への樹脂軸受の初適用 . 東芝レビュー . 58, 1, 2003, p.64 - 67 .



手塚 光太郎 TEZUKA Kotaro

電力・社会システム社 電力・産業システム技術開発センター
回転機器技術開発部主務。水車・ポンプ水車の流体解析・
性能開発に従事。日本機械学会, ターボ機械協会会員。
Power and Industrial Systems Research and Development Center



南波 聡 NAMBA Satoshi

電力・社会システム社 京浜事業所 水力機器部主務。
水車発電機の設計に従事。
Keihin Product Operations



野口 哲哉 NOGUCHI Tetsuya

電力・社会システム社 府中電力・社会システム工場 発電制
御システム部参事。水力発電所の制御設計に従事。電子情
報通信学会会員。
Fuchu Operations - Social Infrastructure Systems