

水車発電機の高効率化を実現する最新技術

Latest Technologies for Realization of Hydro Generators with Higher Efficiency

廣瀬 孝明 HIROSE Takaaki 横江 晴佳 YOKOE Haruka 吉水 謙司 YOSHIMIZU Kenji

水力発電は、再生可能エネルギーの中でも電力系統の出力変動を抑制する役割とベースロード電源の一つとしての役割を担っており、自然エネルギーを有効活用するためにより一層の高効率運転が要求されている。

東芝エネルギーシステムズ(株)は、水車発電機の損失低減に向け、3次元電磁界解析による電気損低減技術、数値流体力学(CFD: Computational Fluid Dynamics)解析やモックアップ試験による風損低減技術、及びスラスト軸受の高面圧化による軸受損低減技術の開発を行った。また、これら複数の損失を連成させて評価する解析手法を構築することで、高効率な水車発電機の最適化設計を実現した。

Hydroelectric power generation is a renewable energy source that is playing a role in the suppression of output power fluctuations in addition to serving as a baseload power supply. Higher efficiency is increasingly required for hydroelectric power systems in terms of the efficient use of renewable energy.

In response to this requirement, Toshiba Energy Systems & Solutions Corporation has developed the following technologies for the reduction of loss in hydro generators: (1) a technology to reduce electrical loss applying three-dimensional (3D) electromagnetic field analysis, (2) a technology to reduce windage loss applying computational fluid dynamics (CFD) analysis and mockup tests, and (3) a technology to reduce bearing friction loss using a thrust bearing with a high specific load. We have also developed optimized design processes for hydro generators with higher efficiency applying coupled analysis capable of interactively determining multiple electrical and mechanical parameters.

1. まえがき

太陽光や風力など、気象条件によって発電出力が変動する再生可能エネルギー発電が増えていく中、水力発電は、電力系統の出力変動を抑制する役割と、ベースロード電源の一つとしての役割を担っており、自然エネルギーを有効活用するために更なる高効率運転が求められている⁽¹⁾。

東芝エネルギーシステムズ(株)は、これらのニーズに応えるため、水力発電機器及び水力発電システムの性能向上に向けて幅広い技術開発を進めている。

ここでは、高効率な水車発電機を実現する最新技術について述べる。

2. 高効率な水車発電機に向けた検討

水車発電機は、図1に示すように、下部の水車が水の力で回転することで、上部の発電機の回転子が連動し、電磁誘導によって固定子のコイルで発電するが、同時に熱損失も発生する。そのため、回転力を利用して発電機内に冷媒を循環させてコイルを冷却しているが、これによって更に風損が発生する。前述の発電機に発生する損失は、電気損と機械損に分類される。電気損は、コイルに電流が流れるこ

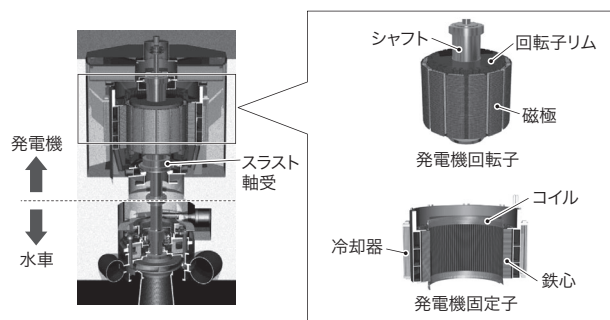


図1. 水車発電機の構造

水の力を利用して水車を回転させ、水車と一体構造になっている発電機回転子が回転することで発電する。

Structure of hydro generator

とで発生する銅損、鉄部やその他の構造物に磁束が漏れいすることで発生する鉄損及び漂遊負荷損に、また、機械損は前述の風損と軸受部の潤滑油の粘性に起因した軸受損に、それぞれ分けられる。

そこで、発電機の高効率化に向け、これらの損失の発生箇所ごとに数値解析やモデル試験を駆使して損失を定量的に捉え、損失低減のための様々な施策を検討した。また、電気損と機械損を連成させて評価する計算手法を構築する

ことで、高効率な水車発電機の最適化設計を実現した。3章では、それらの詳細について述べる。

3. 高効率化のための適用技術

3.1 電気損の低減施策

電気損のうち、漂遊負荷損などのように、漏れ磁束が発電機の各部に流れることで発生する損失については、磁束が様々な箇所へ3次元的に漏れいすることから、これまで定量的に評価することが難しかった。しかし、近年の計算機の性能向上とモデリング技術の進歩に伴って、大規模な3次元電磁界解析が実現できるようになり、図2に示すように、各部の漏れ磁束を定量的に評価することが可能になった。

例えば、鉄心端部の漏れ磁束の評価では、図3のように、ティース部先端に設けるスリットの本数や長さなどを改善することで、ティース部表面に発生する渦電流損を低減できることが分かった。また、コイルエンド部の漏れ磁束の評価では、図4のように、コイル素線のよりピッチを最適化することで、循環電流損を低減できることを確認した。これらのように、漏れ磁束を細部にわたって評価することで、各種損失の低減施策を検討し、効率向上を図ることができる。

3.2 風損の低減施策

風損は、発電機内を冷却する冷媒の循環に伴って発生す

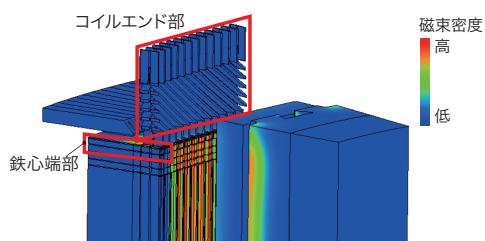


図2. 鉄心端部とコイルエンド部の磁束密度分布の3次元解析結果の例

3次元電磁界解析により、鉄心端部やコイルエンド部といった、各部の漏れ磁束の定量的評価が可能になった。

Example of result obtained by 3D electromagnetic field analysis of iron core terminal and coil end

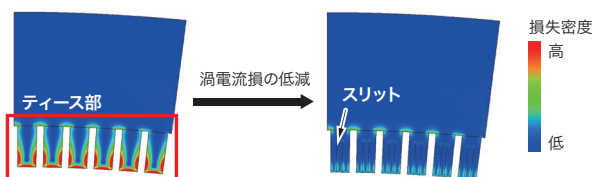


図3. ティース部スリットの最適化による損失低減

ティース部の先端に、最適な本数と長さのスリットを設けることで、ティース表面に発生する渦電流損の低減を実現した。

Loss reduction through optimization of slits at core end teeth

る損失で、冷媒が通過する経路の形状を改良したり、発電機内の流量配分を最適化したりすることで、低減できる。風損の低減施策は、大規模CFD解析とモックアップ試験を併用して検討を進めている。

モックアップ試験装置の主要部を図5に示す。このモックアップは、実際の発電機の1/3スケールで製作したものである。駆動電動機で回転子(直径2.5 m)を実機の定格回転数の3倍(最高3.8倍)で回転させることで、実機と同等の回転子周速条件での通風・風損特性が検証できる。

冷媒は、図5に示した回転子内径側端面に設けた給気孔から回転子内に取り込まれる。ここでは、この給気孔の径方向の位置、開口面積、開口形状をパラメーターとして特性試験を実施し、冷却性能の指針である冷媒流量と風損の関係を評価して最適化した結果を示す。

給気孔の位置をパラメーターとした試験結果を、図6に示す。横軸は冷媒流量、縦軸は回転子と固定子のギャップ部で得られる回転子吐出圧力であり、従来設計の冷媒流量、吐出圧力を基準として示した。給気孔が外径側へ移動することで、回転子の回転に伴う遠心力が減少するため、冷媒

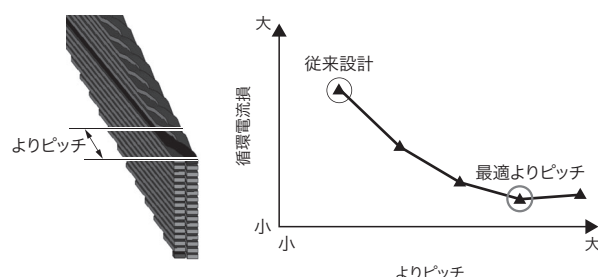


図4. コイル素線のよりピッチの最適化による損失低減

コイル素線のよりピッチの大きさを最適にすることで、循環電流損の低減を実現した。

Loss reduction through optimization of coil wire twisting pitch

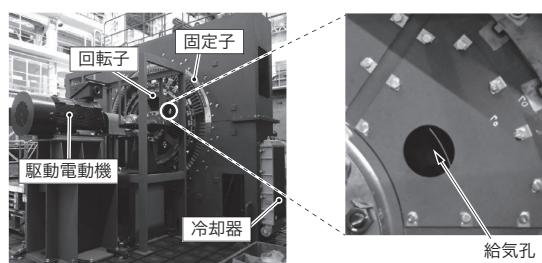


図5. 1/3スケールのモックアップ試験装置と給気孔

発電機内を冷却する冷媒が通る経路での、流れの状態を模擬することで、形状改良などの検証を行う試験装置である。

Test equipment for 1/3-scale mockup of hydro generator and air inlet hole

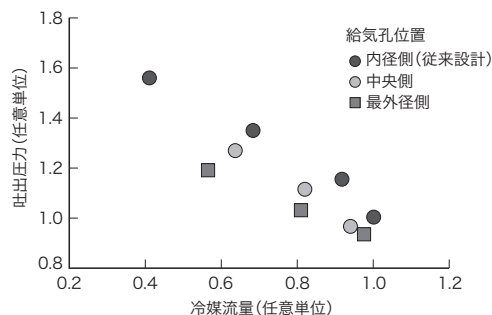


図6. 給気孔の位置をパラメーターとした冷媒流量と吐出圧力の関係
給気孔が外径側へ移動することで、冷媒流量と吐出圧力が減少することが分かる。

Flowrate - pressure characteristics of rotor depending on location of air inlet hole

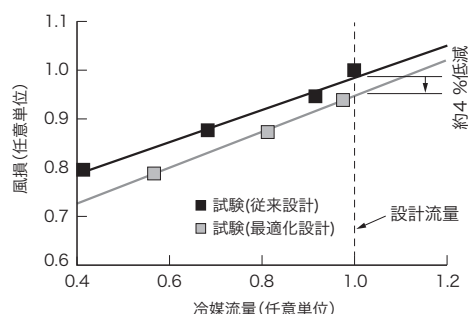


図7. 冷媒流量と風損の関係

給気孔の最適化を図ることで、広い冷媒流量範囲で風損を低減することが可能になった。

Relationship between flow rate of coolant and windage loss

流量と吐出圧力が減少することが分かる。

冷媒流量の減少は、冷却不足によるコイル温度の上昇を引き起こすため、CFD解析により、冷却に必要な冷媒流量を確保しつつ風損を低減できる、給気孔の位置、開口面積、開口形状の条件を検討した。得られた条件（最適化設計）と従来設計の条件で実施した特性試験結果を、図7に示す。横軸は冷媒流量、縦軸は風損を示しており、従来設計値を基準として示した。給気孔の最適化を図ることで、広い冷媒流量範囲で風損を低減でき、設計流量において風損を約4%低減できることを確認した。

このように、CFD解析とモックアップ試験を組み合わせることで、風損の低減施策の選定と検証を行い、実機設計に迅速に反映させることが可能になった。

3.3 軸受損の低減施策

水車発電機の軸受部は、発電機、水車の回転部質量及び水推力を支えるスラスト軸受、水車の振れ回りを抑えるためのガイド軸受で構成されている。

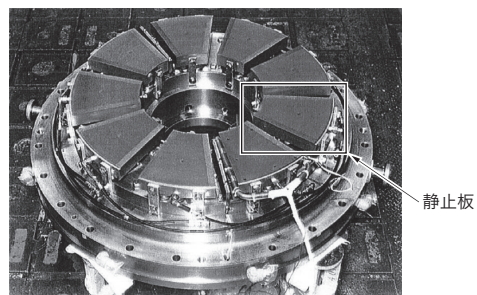


図8. スラスト軸受

スラスト軸受は、回転方向に複数並べられた静止板によって回転軸の荷重を支えている。

Thrust bearing

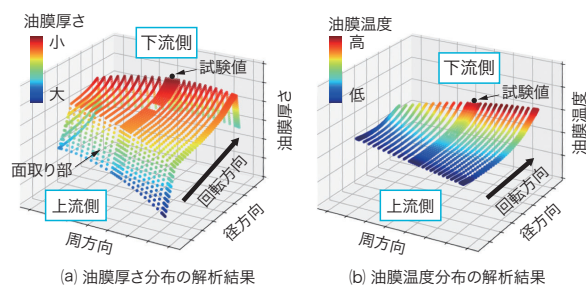


図9. 静止板上の油膜の厚さと温度の解析と試験結果の比較

試験値は解析結果とよく一致し、開発した解析手法の有効性と精度が確認できた。

Comparison of results of measurements and simulations of thickness and temperature distribution of oil film

図8のスラスト軸受では、2章で述べたように、潤滑油の粘性に起因した軸受損が発生する。軸受損を低減するには、スラスト軸受を小型化し、摺動面での摩擦損失と油槽内の攪拌（かくはん）損失を低減することが有効である。スラスト軸受の小型化には、より小さい面積の静止板で荷重を支える“高面圧化”が必要となる。

一方、高面圧化すると、油膜が薄くなり、回転部と静止板の接触による焼き付きのリスクが高くなる。スラスト軸受の静止板は、熱や荷重によって変形するが、軸受の最小油膜厚さは数十 μm と非常に薄いため、油膜厚さや油膜温度を正確に評価し、僅かな変形でも考慮する必要がある。そのため、従来の解析モデルをより高度化し、構造・熱・流体を連成させた解析手法を新たに開発した。図9に示すように、試験値は解析結果とよく一致し、十分な解析精度を備えていることを確認した。

今回開発した解析手法を用いて、高面圧化の施策の評価を行った。摺動部材の厚さや面取り深さを最適化することで、図10に示すように、従来設計と比較して、油膜厚さ

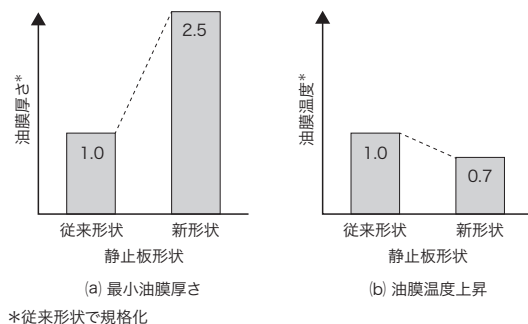


図10. 最小油膜厚さと油膜温度上昇の解析結果

新形状は、従来形状よりも油膜厚さが厚く、温度上昇も抑えられたので、高面圧化が可能になった。

Results of simulations of minimum thickness and temperature rise of oil film

を2.5倍に向上させるとともに、温度上昇を30%低減し、従来の当社実績に対して面圧を50%以上向上させられる見込みが得られた。

今後、更なる高面圧化の手法を開発するとともに、モックアップ試験で高面圧軸受の検証を実施し、より一層の軸受損の低減を目指す。

3.4 連成計算による最適化設計

水車発電機の設計は、様々なパラメーターが影響するため、電気損と機械損のトレードオフを考慮する必要がある。したがって、最適化設計を実現するには、電気設計と機械設計を相互に検討することが重要である。

そこで、図11に示すような、電気設計と機械設計を連成させた自動解析フローを構築することで、効率や水車発電機の質量などを設定した目的関数に対し、多数の設計案の策定を可能にした。水車発電機の質量に対して高効率とな

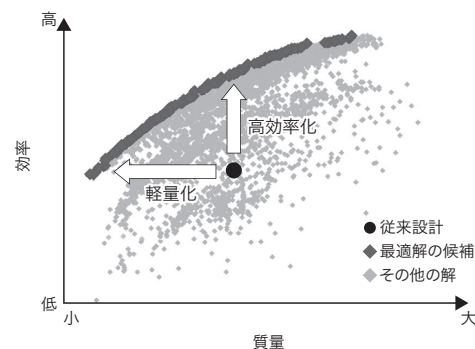


図12. 最適化の解析結果例

最高効率となる設計解や、軽量で効率の高い設計解など、目的に応じた設計が可能になった。

Example of results of optimization using coupled analysis

る設計解を、連成計算で求めた結果の例を図12に示す。より高効率な設計解や、同等の効率の中でより軽量な設計解など、各仕様にに応じた最適設計解を選択できる。

今後は、3.3節までに述べたような、様々な損失の低減施策を反映させ、更に高効率な水車発電機の実現を目指す。

4. あとがき

水車発電機の高効率化を目的とした、電気損や、風損、軸受損など各種損失の低減技術の開発、及びそれらの損失を連成させた評価手法を構築することによる、最適化設計について述べた。

今後も、水車発電機の更なる高効率化を目指し、技術開発を継続していく。

文 献

- (1) 戸田一典, 森 淳二, 水力発電をめぐる市場動向と東芝の取組み, 東芝レビュー, 2015, 70, 1, p.2-6.

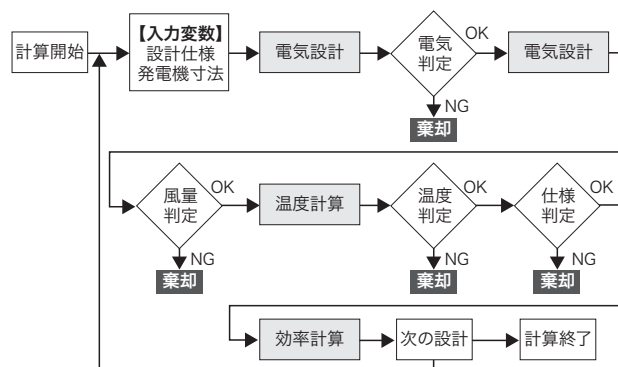


図11. 自動解析フロー

電気設計と機械設計を連成させた設計フローを構築することで、効率や発電機質量を目的関数とした、多数の設計案が策定可能になった。

Flow of processes for automatic coupled analysis



廣瀬 孝明 HIROSE Takaaki
東芝エネルギーシステムズ(株)
パワーシステム事業部 パワーシステム企画部
電気学会会員
Toshiba Energy Systems & Solutions Corp.



横江 晴佳 YOKOE Haruka
東芝エネルギーシステムズ(株)
エネルギーシステム技術開発センター 機械技術開発部
日本機械学会会員
Toshiba Energy Systems & Solutions Corp.



吉水 謙司 YOSHIMIZU Kenji
東芝エネルギーシステムズ(株)
エネルギーシステム技術開発センター 機械技術開発部
日本機械学会会員
Toshiba Energy Systems & Solutions Corp.