

コンバインドサイクル発電プラント用タービン発電機の高効率化技術

High-Efficiency Technologies for Turbine Generators of Combined-Cycle Thermal Power Plants

大島 直久 今井 岳彦 上田 隆司

■ OSHIMA Naohisa ■ IMAI Takehiko ■ UEDA Takashi

コンバインドサイクル発電プラントのニーズの高まりとともに、これに適用される300 MVA級の中容量タービン発電機の高効率化が求められている。

東芝は高効率機の実現に向けて、目標効率に合った最小重量のタービン発電機を自動計算する最適化設計手法を開発するとともに、タービン発電機の各構造物の損失を低減させるため、流体解析による風損の低減技術、改良型楕円（だえん）軸受の採用による軸受摩擦損の低減技術、及び3次元磁界解析による漂遊負荷損の低減技術を開発した。これらの高効率化技術の適用により、効率を従来機より約0.2%向上させたタービン発電機の設計が可能になった。

Accompanying the increase in demand for combined-cycle thermal power plants, there is a growing need for higher efficiency indirectly hydrogen-cooled turbine generators with an intermediate capacity in the 300 MVA class.

With the aim of realizing such turbine generators, Toshiba has developed an optimization design process that can automatically minimize the size of generator appropriate to the required efficiency. We have also developed a technology to improve cooling efficiency applying fluid analysis, a technology to reduce bearing friction loss by the use of lower loss elliptical bearings, and a technology to reduce stray load loss applying three-dimensional magnetic field analysis. As a result, a newly developed turbine generator applying these technologies has achieved approximately 0.2% higher efficiency compared with conventional turbine generators.

1 まえがき

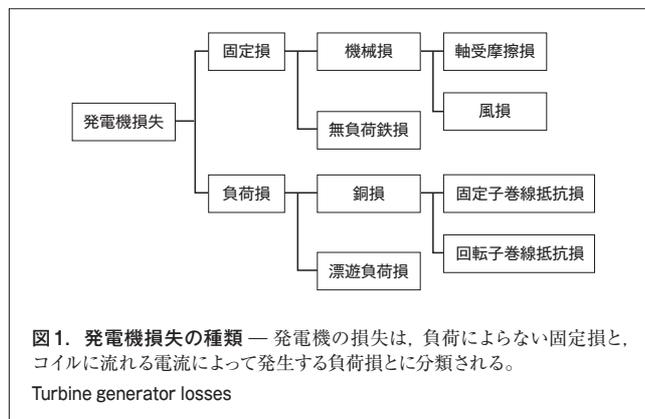
火力発電プラント用タービン発電機は、大容量化や高効率化などの面で技術的發展を遂げており、東芝は石炭火力発電プラント用に大容量機で99%以上の高効率化技術の開発と適用を実現してきた^{(1), (2)}。

一方、米国では現在、シェールガスの生産が急速に伸びており、発電用燃料として天然ガスの利用拡大が進んでいる。また、二酸化炭素(CO₂)排出量の削減という環境面から、天然ガスを燃料とする高効率なコンバインドサイクル発電プラントへのニーズが高まってきている。

このニーズに応えるため、当社は、コンバインドサイクル発電プラントの出力に適した、300 MVA級 中容量水素間接冷却タービン発電機の高効率化技術の開発を進めている。ここでは、当社が開発した高効率化技術と、それを適用したタービン発電機の設計結果について述べる。

2 高効率化に向けた発電機損失の低減施策

同期機である発電機の損失は図1に示すように分類される。大きく分けて、軸受での摩擦損、発熱するコイル及び、鉄心、その他構造物を冷却するための冷媒が機内を循環することによって発生する風損、並びに無負荷鉄損といった負荷によらな



い固定損と、コイルに流れる電流によって発生する負荷損とに分類される。

損失の割合を中容量機と大容量機で比べると、中容量機では固定損の割合が全損失の約40%を占め、大容量機の場合の約30%と比べて大きい。中容量タービン発電機を高効率化するためには、固定損を低減する技術が有効である。

固定損を低減するために有効な施策の一つとして、発電機の小型・軽量化が挙げられる。発電機の寸法及び重量は基本設計段階で決定されるため、鉄心の磁束密度分布や、各部機械強度、通風構造、各部温度上昇などといった設計の基本条件に従いながら、いかに無負荷鉄損や銅損といった損失の

低減が図れるかがポイントとなる。

また、軸受摩擦損や風損のように、構造物ごとに低減を検討できる損失は、個別に検討して、様々な損失低減技術を積み重ねることで全体的に低減できる。

更に、従来は定量的な評価が困難であった漂遊負荷損についても、3次元磁界解析の活用により各構造物で発生する損失を評価して最適設計をすることで低減できる。

3 高効率化のための適用技術

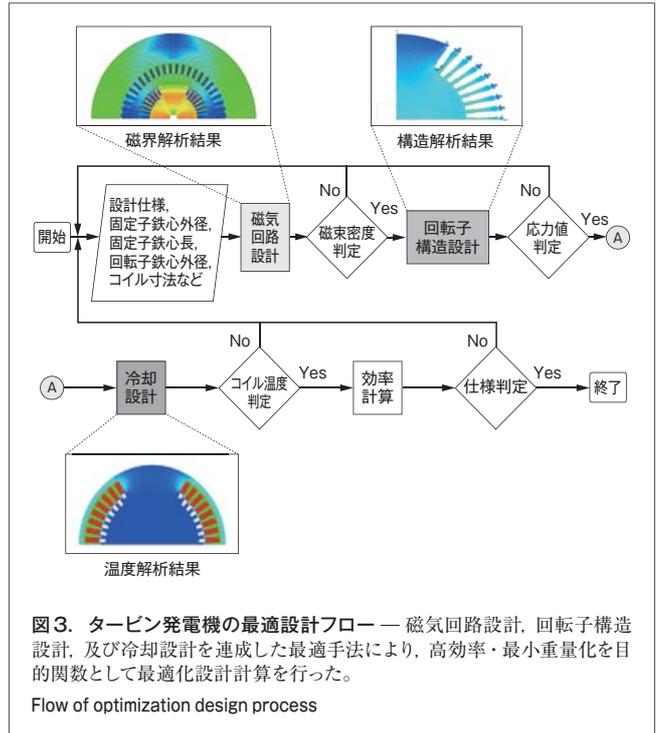
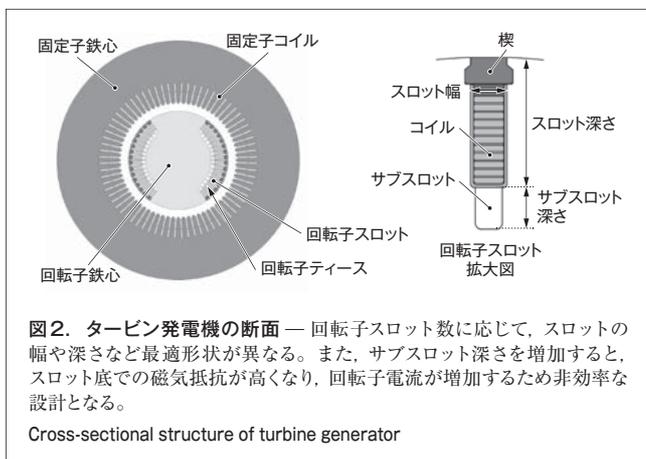
3.1 最適化計算による基本設計

タービン発電機の高効率化を実現するために、磁束密度、機械応力、及び温度を複合的に評価することで設計の最適化を検討した。従来の設計手法では磁束密度、機械応力、及び温度を個別に評価して設計を行ってきたが、評価項目と求める設計条件が多岐にわたり複雑に関係するため、最適設計を行うことが困難であった。

その一例を図2を用いて述べる。回転子構造では、各部の磁束密度を評価しながら回転子コイル断面積を増加させることで回転子巻線抵抗損の低減を図るが、一方で高速回転のタービン発電機では回転子ティース部の応力を確保する必要がある。回転子スロット数に応じて、スロットの幅や深さなど最適形状が異なる。また、回転子コイルの温度を評価する冷却設計では、回転子サブスロットに冷媒を流して冷却を行う場合、冷却性能を上げるためにサブスロット深さを増加させると、スロット底での磁気抵抗が高くなり回転子電流が増加するため、非効率な設計となる。

そこで、磁気回路設計、回転子構造設計、及び冷却設計を連成した手法を適用することにより、タービン発電機の基本設計を計算機を用いて自動的に行い、多数の設計案の中から最適解を求めることが可能になった。

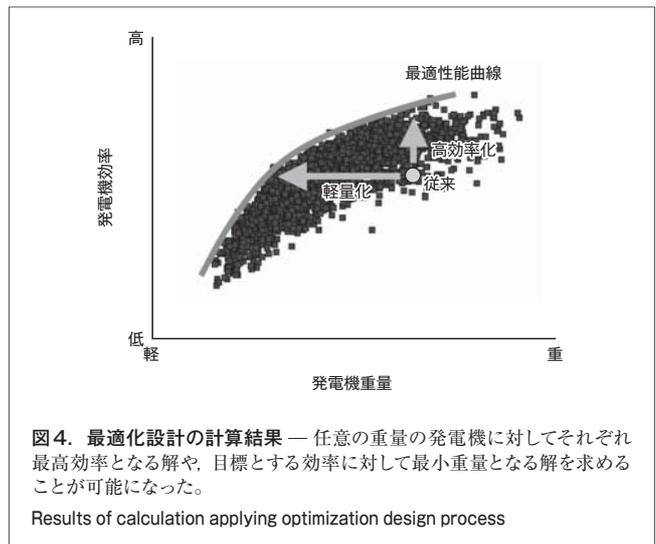
最適設計手法のフローを図3に示す。磁気回路設計、回転子構造設計、及び冷却設計を連成した最適化手法により、固

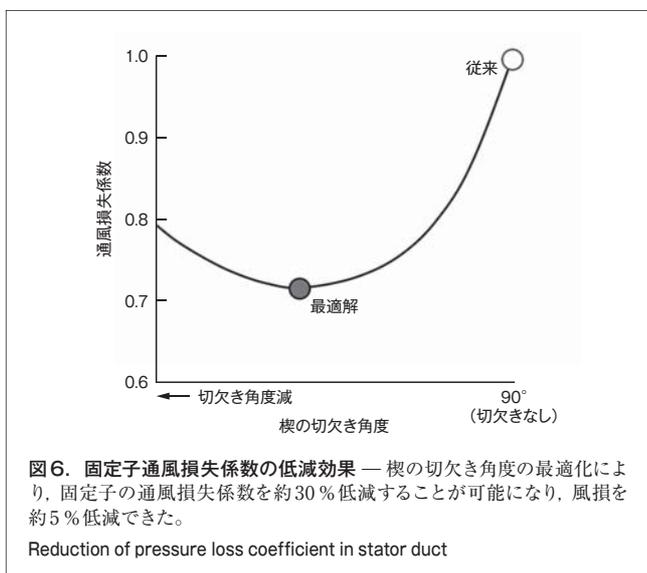
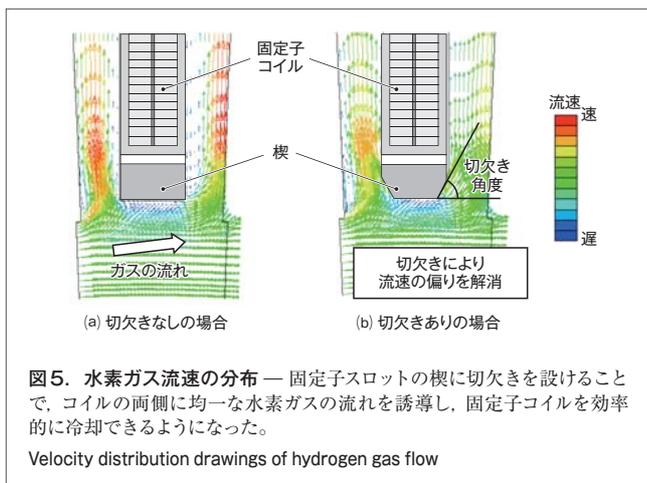


定子鉄心外径や、固定子鉄心長、回転子鉄心外径、固定子コイルと回転子コイルの寸法などの設計変数をパラメータとし、高効率・最小重量化を目的関数として最適化設計計算を行った。その結果、図4に示すように任意の重量の発電機に対してそれぞれ最高効率となる解や、目標とする効率に対して最小重量となる解を求めることが可能になった。

3.2 流体解析による風損の低減

固定子コイルの冷却は固定子鉄心に設けた通風ダクトに冷却用の水素ガスを流して行っている。固定子スロットにはコイルを固定するために楔（くさび）が設けられているが、従来の設計では通風ダクト部の楔断面形状は矩形（くけい）であった。





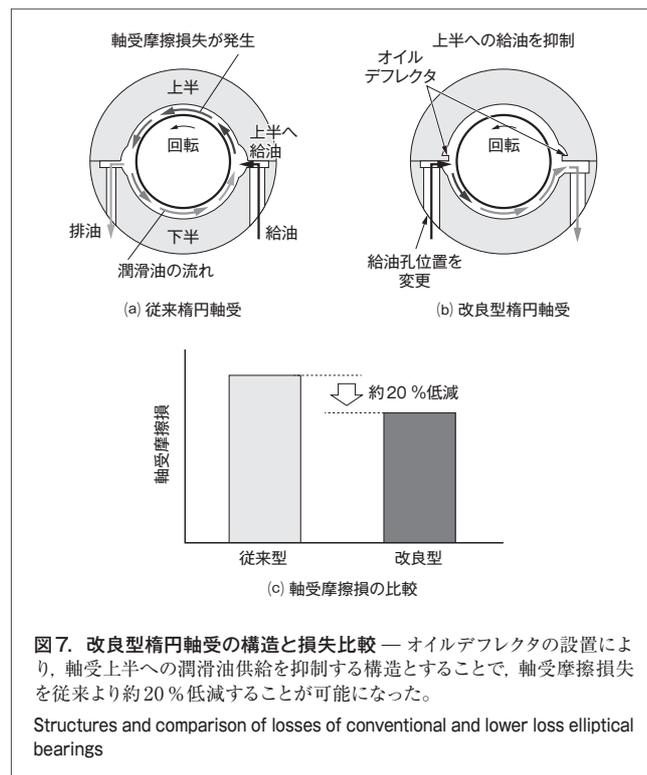
この場合、流体解析結果によると、局所的に水素ガスの流速が速い部位があり、固定子コイルを効率的に冷却できていないことが明らかになった。そこで図5に示すように楔に切欠きを設けて、コイルの両側に均一な水素ガスの流れを誘導すると、固定子コイルを効率的に冷却できることがわかった。

楔の切欠き角度を最適化すると、図6に示すように固定子の通風損失係数を約30%低減することが可能になり、風損を約5%削減できた。更にこの結果、固定子の通風ダクト数を従来より低減することも可能になり、発電機の全長を短縮することで小型・軽量化も実現できた。

3.3 軸受摩擦損失の低減

発電機の軸受は回転子荷重を支持するほか、低速域から高速域まで安定な振動状態を保つことが要求されるため、楕円軸受が採用されている。

従来の軸受構造では、軸受の上半及び下半のいずれにも潤滑油を循環させる構造であったため、荷重を支持しない軸受上半にも軸受摩擦損失が発生していた。



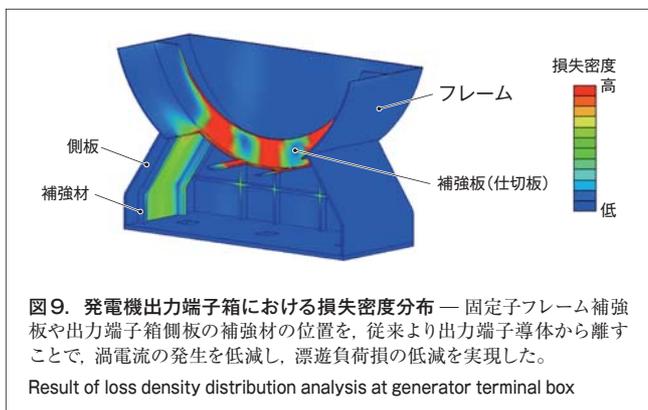
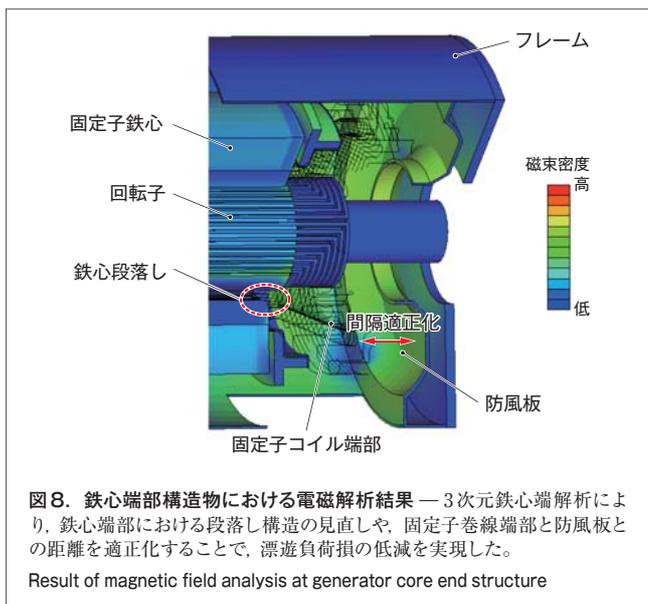
そこで、図7に示すように、給油孔の位置変更とオイルデフレクタの設置により軸受上半への潤滑油供給を抑制する構造とすることで、軸受摩擦損失を従来より約20%低減することが可能になった。

3.4 漂遊負荷損の低減

漂遊負荷損は、主に発電機各部の漏れ磁束に起因する損失で、固定子鉄心、回転子鉄心、及び固定子巻線で発生する損失と、フレームや端子箱などの構造物で発生する損失に分類される。固定子鉄心、回転子鉄心、及び固定子巻線における損失は比較的精度良く評価可能であるが、フレームや端子箱など発電機の付帯構造物における損失は、回転子巻線及び固定子巻線の作る磁束が3次元のかつ過渡的に変化するため、従来は定量的な評価が困難であった。しかし、近年の計算機性能の向上に伴い、発電機全体を対象とした大規模な3次元磁界解析が可能になってきており、これまで評価が困難であった各種構造物で発生する損失を定量的に算出して、損失が大きい部位を特定し損失低減施策を立案することが可能になった。

例えば図8に示すように、発電機フレームや防風板などの鉄心端部構造物を含めた3次元鉄心端部解析により、鉄心端部における段落し構造の見直しや、固定子巻線端部と防風板との距離を適正化することで、漂遊負荷損の低減を実現した。

また、発電機出力端子箱やフレームは機械的強度を保つために補強材を設ける構造としているが、図9に示す出力端子箱周辺における損失密度分布の解析結果によると、フレーム



補強板及び出力端子箱側板の補強材での損失が大きかったことが明らかになった。そこで、フレーム補強板や出力端子箱側板の補強材の位置を、従来より出力端子導体から離すことで、渦電流の発生を低減し、漂遊負荷損の低減を実現した。

こうした構造の見直しなど、様々な漂遊負荷損の低減施策を積み重ねることにより、いっそうの効率向上を達成した。

4 高効率化技術を適用して設計したタービン発電機

3章で述べた高効率化技術を適用して設計したタービン発電機の主な性能と、従来機との比較を表1に示す。

3.1節で述べた最適化設計手法による高効率化並びに小型・軽量化設計の実現と、各々の損失低減施策により、タービン発電機の総重量を従来機より約10%低減して出力密度(単位重量当たりの出力: MW/t)を約20%向上させ、また効率を約0.2%向上できる開発機の設計を完了した。

表1. 開発したコンバインドサイクル発電プラント用タービン発電機と従来機の性能比較

Comparison of ratings and specifications of conventional and newly developed turbine generators

項目	仕様及び性能	
	開発機	従来機
定格容量 (MVA)	290	270
定格周波数 (Hz)	60	60
定格力率	0.9	0.9
水素ガス圧 (kPag)	310	310
総重量 (PU)	0.9	1
出力密度 (PU)	1.2	1
効率* (設計値) (%)	99.0	98.8

PU: 従来機を1としたときの相対値

* JEC-2130-2000 (電気規格調査会規格2130-2000)による

5 あとがき

当社が開発したタービン発電機の高効率化技術と、それを適用した設計結果について述べた。

今後もコンバインドサイクル発電プラント用タービン発電機の内々高効率化、及び小型・軽量化を目指した技術開発を継続していく。

文献

- 富木広明 他. 固定子コイル水素間接冷却を適用した60 Hz 大容量タービン発電機. 東芝レビュー. 65, 2, 2010, p.48-51.
- 伊藤裕道 他. 世界最大タンデム1,000 MWタービン発電機の完成. 東芝レビュー. 56, 6, 2001, p.21-24.



大島 直久 OSHIMA Naohisa

電力システム社 火力・水力事業部 火力電機技術部主務。
火力発電所建設の電機システムのエンジニアリング業務に従事。
電気学会会員。

Thermal & Hydro Power Systems & Services Div.



今井 岳彦 IMAI Takehiko

電力システム社 京浜事業所 発電機部。
タービン発電機の設計・開発に従事。電気学会会員。

Keihin Product Operations



上田 隆司 UEDA Takashi

電力システム社 電力・社会システム技術開発センター 回転機器開発部主務。回転機器の電磁気技術の開発に従事。
電気学会会員。

Power and Industrial Systems Research and Development Center