

幅広い負荷変動に対応可能な 火力発電用タービン発電機技術

Technologies for Turbine Generators of Thermal Power Plants with Capability to Enhance Efficiency and Shorten Startup Times over Wide Load Range

長倉 謙 NAGAKURA Ken 植原 辰巳 UEHARA Tatsumi 石崎 駿佑 ISHIZAKI Shunsuke

近年、火力発電には、二酸化炭素（CO₂）排出量削減のための高効率化や、導入が拡大している再生可能エネルギー発電の出力変動を調整する電源としての役割、運用性向上によるコスト低減などへの要求が高まっている。

東芝エネルギーシステムズ(株)は、幅広い負荷範囲で高効率に運転できる水素間接冷却タービン発電機を開発してきた。また、近年の負荷調整電源への対応として、より高効率に短時間で起動できる中・小容量帯の新設タービン発電機に加え、既設の火力発電の改修に適用する技術の開発も進めている。

In electricity markets, demand has arisen in recent years for thermal power plants to play a new role as electricity sources capable of adjusting to output fluctuations accompanying the widespread dissemination of renewable energy systems and to improve their operability for the reduction of costs, in addition to the ongoing need to achieve higher efficiency for the reduction of carbon dioxide (CO₂) emissions.

Toshiba Energy Systems & Solutions Corporation has been focusing on the development of turbine generators for thermal power plants of various capacities employing an indirectly hydrogen-cooled system that can be operated with high efficiency over a wide load range. We are now developing turbine generators for the construction of new small- and medium-capacity thermal power plants that can enhance the efficiency and shorten the startup times of such plants, as well as technologies for the renewal of existing thermal power plants that can expand their capability to adjust to output fluctuations according to load variations resulting from the introduction of renewable energy systems and contribute to the reduction of plant operation costs.

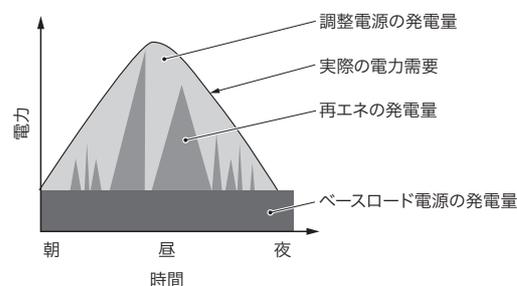
1. まえがき

従来、火力発電所は、経済の発展に伴い大容量化の方向に発展を遂げ、タービン発電機も大容量化・高効率化を重視した開発が行われてきた。そして、2015年のパリ協定での合意後、CO₂排出量削減の要求が急速に高まり、火力発電プラントには更なる高効率化が求められるようになった。

一方、CO₂排出量削減を目的として、発電に風力や太陽光などの再生可能エネルギー（以下、再エネと略記）を導入する動きも拡大している。再エネによる発電出力は、気象条件に左右されやすいため、大量に導入すると電力供給が不安定になるおそれがある。これを防ぐために、火力発電には、調整電源としての役割を担うことが期待されている（図1）。このような用途では、火力発電用のタービン発電機は、再エネの出力に応じた幅広い負荷変動や、1日に複数回の起動／停止、以前より大きい電圧変動と周波数変動といった、より厳しい条件で運転される。

また、ベースロード電源には、気象条件などに左右されにくいエネルギー源が不可欠なので、火力発電は、今後もベースロード電源として使われる。

このような背景から、タービン発電機には、負荷や、電



*資源エネルギー庁、「再生可能エネルギーに欠かせないのは「火力発電」!」⁽¹⁾を基に作成

図1. 電力需要と発電量の1日の変化

再エネによる発電は、気象条件などの影響を受けやすいので不足する電力を適時調整する必要がある、この重要な役割を火力発電が担う。

Daily changes in electricity demand and electric power generation

圧、周波数などの更に大きな変動に対応するための運転可能領域の拡大、部分負荷帯（小出力領域）も含めた幅広い負荷範囲での効率向上、及び1日に複数回の起動／停止に対応できる運用性の向上が求められる。これらは、新設だけでなく、既設のタービン発電機の改修にも欠かせない。

ここでは、今後も電力供給の要を担う火力発電に使われる、タービン発電機の技術開発について述べる。

2. 新設プラント向けタービン発電機の動向と適用技術

タービン発電機の冷却方式には、その容量帯により、空気冷却方式、水素間接冷却方式、固定子コイル水直接冷却方式がある。この中で、構造がシンプルで効率の高い水素間接冷却方式は、適用容量の拡大が進められている。

東芝エネルギーシステムズ(株)は、2000年頃から水素間接冷却タービン発電機の開発に取り組んでおり、200 MVA級の中小容量から900 MVA級の大容量までの幅広い範囲に適用容量を拡大してきた(図2)⁽²⁾。

2.1 水素間接冷却タービン発電機へのTOSλの導入

水素間接冷却タービン発電機の大容量化に大きく貢献した技術が、固定子コイル高熱伝導絶縁システムTOSλ(トスラムダ)である。

固定子コイルの水素間接冷却方式では、導体で発生した熱は、コイル絶縁層を介して、鉄心から水素ガスへと放出される(図3)。TOSλは、このコイル絶縁層の熱伝導率を、

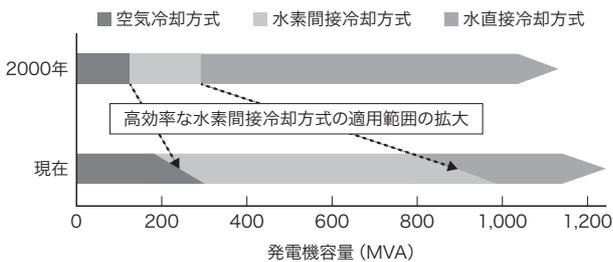
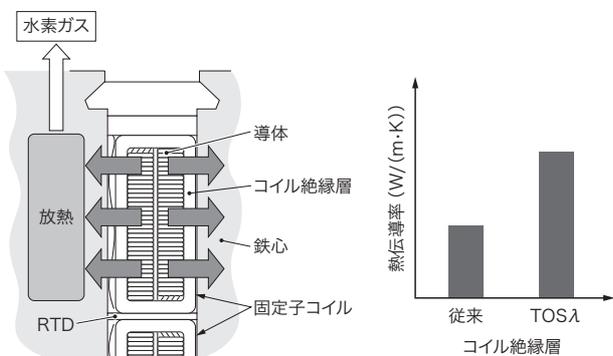


図2. タービン発電機の冷却方式と適用容量

2000年に比べて、水素間接冷却方式の適用容量が幅広い範囲に拡大している。

Turbine generator cooling methods and applicable capacities



RTD: 測温抵抗体

図3. 水素間接冷却方式による固定子コイルの放熱

導体で発生した熱は、コイル絶縁層を介して鉄心から水素ガスへと放出される。

Heat radiation from indirectly hydrogen-cooled stator bar

新しい材料の適用などにより向上させたものである。TOSλの適用で、固定子コイルの冷却能力が大幅に向上した。

TOSλは、従来の水直接冷却方式が担っていた大容量領域にまで水素間接冷却方式を適用可能にし、2000年以降の水素間接冷却タービン発電機の容量拡大に貢献してきた。2018年には、TOSλを適用した716.667 MVAのタービン発電機を実用化した。

2.2 コンバインドサイクル向けタービン発電機の高効率化

火力発電の高効率化のために、コンバインドサイクル発電の採用が増加している。ガスタービンの余熱で蒸気タービンによる発電も行うため、プラント効率が高い。

当社は、コンバインドサイクルで使用する水素間接冷却タービン発電機にTOSλを適用し、2017年に両軸駆動コンバインドサイクル向けの650 MVAタービン発電機を製造し、工場試験で99.1%を超える高効率を確認した。

2.3 中・小容量コンバインドサイクル向けタービン発電機へのTOSλの適用

コンバインドサイクル発電は、起動時間が短く、起動/停止が比較的容易にできるという特長がある。効率の高さと起動/停止の容易さを生かして、調整電力として使用する新設プラントには、火力発電方式の中でもコンバインドサイクル方式が採用される割合が高くなっている。この用途に適した中・小容量帯(200～350 MVA程度)のタービン発電機のニーズも同様に高まっており、TOSλの導入で、従来よりもコンパクトな製品を提供することが可能になる。

この容量帯では、空気冷却タービン発電機も適用できるが、水素間接冷却タービン発電機は、空気冷却に比べて効率が高く、特に部分負荷帯でも効率の低下が小さいという特長がある(図4)。空気冷却は、水素ガスを必要としな

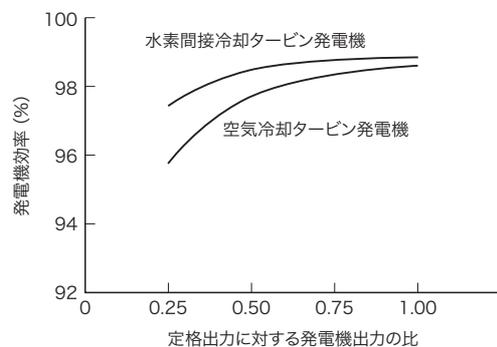


図4. 水素間接冷却タービン発電機と空気冷却タービン発電機の効率曲線の比較

水素間接冷却タービン発電機は、どの出力でも空気冷却タービン発電機より効率が高く、部分負荷帯ではその差が大きくなる。

Comparison of efficiency curves of hydrogen-cooled and air-cooled generators

いため、よりシンプルなシステムではあるが、設備のサイズが大きく、部分負荷では効率が大きく低下する。したがって、負荷変動の大きいタービン発電機には、TOSλを適用したコンパクトな水素間接冷却が最適である。

中・小容量のコンバインドサイクル向けの水素間接冷却タービン発電機にTOSλを適用することで、1日に複数回の起動/停止に対応するだけでなく、部分負荷帯から定格までの運転可能領域内全体での効率向上が可能になる。

3. 既設タービン発電機へのTOSλの適用

これまで、新設プラント向けに開発し適用してきたTOSλの技術を、既存のタービン発電機の改修に適用することで、出力向上などの運転可能領域の拡大や、風損（空気力学的摩擦による損失）低減による高効率化、長寿命化による運用性の向上などが可能になる。この結果、既設の火力発電所を有効活用でき、コスト低減に貢献できる。

3.1 水素間接冷却タービン発電機の出力向上

TOSλを、既設の水素間接冷却タービン発電機の固定子コイル巻き替えに適用することで、出力向上が可能になる。

図5に、最大容量270 MVAの既設タービン発電機の出力向上検討例を示す。既設の出力可能範囲は、図中のA, B, C, 及びDを結ぶ領域である。このとき、固定子コイルをTOSλで巻き替えると、固定子コイルの冷却能力を向上

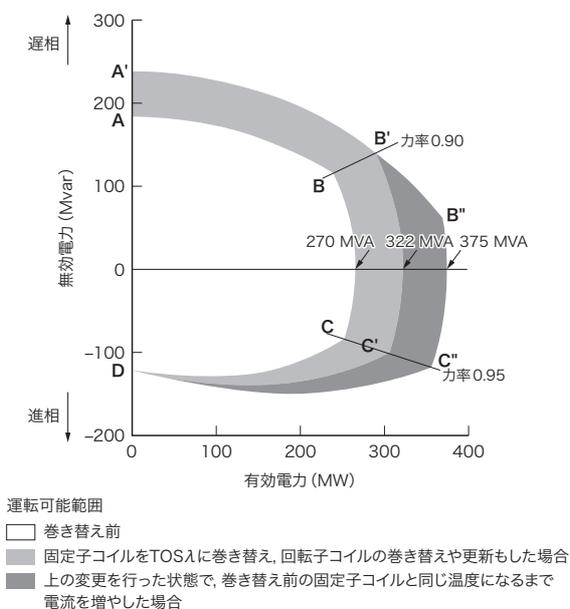


図5. TOSλで固定子コイルを巻き替えたときの発電機の出力向上
TOSλで巻き替えることで冷却能力が向上するため、電流を増やすことができ、270 MVAだった発電機の容量を375 MVAまで大幅に向上できる。
Increase in generator output after rewinding of stator coils using high-thermal-conductivity insulation technology

できるため、同じ出力で使用した場合、固定子コイルの温度を低減できる。これに、回転子コイルの巻き替えや更新などの改善施策を組み合わせることで、出力可能範囲はA'B'C'Dになり、最大容量は322 MVAに拡大する。更に、固定子コイルの温度が既設と同じ温度になるまで電流を増加させると、タービン発電機の出力可能範囲はA'B'C'Dを結ぶ領域になり、最大容量は375 MVAに拡大できる。

3.2 風損低減による効率向上

TOSλの適用で向上した冷却性能に相当する分を、回転子ファンの交換でタービン発電機の機内風量を下げたり、水素ガス圧を低減したりすることで、発電機の風損を減少させることも可能になる。

図6に、固定子コイルをTOSλで巻き替えて風量及び水素ガス圧を下げた場合の効率改善率を示す。風損を低減した結果、定格負荷(負荷100%)で0.03%、部分負荷(負荷25%)で0.13%の効率向上が可能となり、部分負荷の領域でも大きな効率改善効果が得られる。

3.3 長寿命化による運用性向上

ベースロード電源として運転してきたタービン発電機を負荷調整電源として使う場合は、これまでよりも起動/停止の回数や負荷変動の大きい運転が多くなる。このとき、固定子コイル電流は大きく変動するため、固定子コイルの温度も変化し、熱による伸びと縮みが繰り返して発生する。この結果、固定子コイル絶縁層には熱的・機械的な負荷が繰り返して掛かることになり、寿命短縮が懸念される。

TOSλは、固定子コイルの温度上昇を低減できるため、これらの熱的・機械的負荷を緩和できる。図7に固定子コイルに電流を流したときの、導体の温度、及び固定子コイル間に設置した図3に示すRTD(測温抵抗体)の温度の測定結果を示す。コイル絶縁層が従来の場合とTOSλの

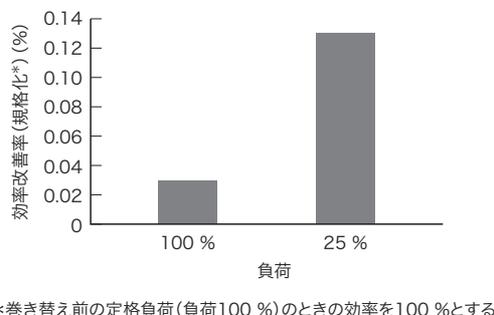


図6. TOSλで固定子コイルを巻き替えたときの風損低減によるタービン発電機の効率改善
TOSλで固定子コイルを巻き替えると、冷却に必要な風量を減らすことができるので、風損を低減し、効率向上が可能となる。
Improvement of generator efficiency after rewinding of stator coils

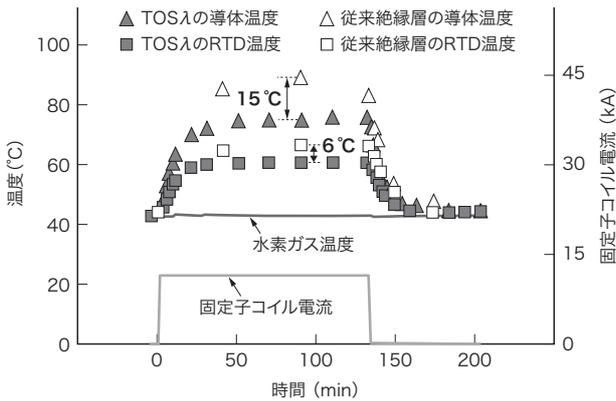


図7. 固定子コイルの温度比較

TOSλを適用した場合、導体の温度を15℃低く抑えられる。

Comparison of temperature of stator coils wound using conventional and high-thermal-conductivity insulation technologies

場合で比較したものであり、コイル絶縁層以外の設計は同一である。TOSλを使った場合は、従来に比べて導体温度で15℃の低減効果が確認できた。

このように、固定子コイルをTOSλで巻き替えることにより、固定子コイル絶縁層への負荷を低減できるので、劣化を抑制し、長寿命化が可能になる。この結果、既設のタービン発電機の運用性が向上し、負荷調整に適用できるようになるので、既設プラントを有効活用することでコスト低減につながる。

4. 電圧・周波数変動や進相運転への対応

再エネの増加に伴って、変動が大きくなることが懸念される電圧・周波数変動や、無効電力への対応も重要である。電圧が高く周波数が低い条件や進相（図5の出力可能曲線

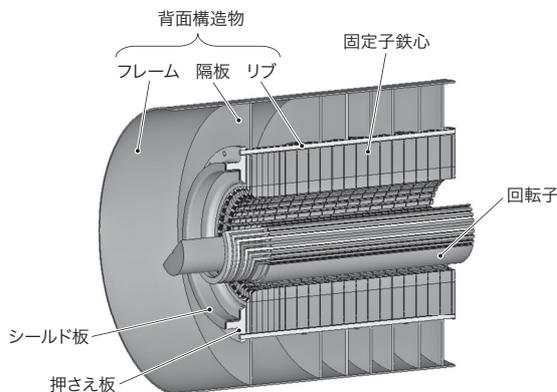


図8. 固定子鉄心端部電磁界解析モデル

鉄心端部から、フレームや、隔板、リブなどの背面構造物などの影響までも考慮した電磁界解析を行い、構造を最適化する。

Electromagnetic analysis model of stator coil end

でマイナス側) 運転時には、鉄心端部の磁束密度が高くなるので、過熱やそれによる損傷などを防ぐため、その挙動を把握して適切な対策を実施する必要がある。

近年では、解析技術や計算機性能の向上により、大規模な3次元電磁界解析が可能になっている^[3]。図8に示すように、タービン発電機の鉄心端部から鉄心背面構造物まで考慮した解析を行うことで、従来よりも厳しい電圧・周波数変動や進相運転にも対応したタービン発電機の設計・製造に反映している。

5. あとがき

今後の火力発電所は、調整電源やベースロード電源としての役割を担い、電力の安定供給の要として期待されている。

これまでは、水素間接冷却タービン発電機の大容量化に貢献してきたTOSλの技術を、調整電源として使用される火力発電のタービン発電機に適用することで、次のような効果が得られる。

- (1) 負荷変動などに対応するための運転可能領域の拡大
- (2) 幅広い負荷範囲での効率向上
- (3) 1日複数回の起動/停止に対応できる運用性の向上

今後も、TOSλや電磁界解析などの技術を生かし、信頼性の高いタービン発電機を提供して、安定した電力供給に貢献していく。

文献

- (1) 資源エネルギー庁. “再生可能エネルギー拡大に欠かせないのは「火力発電」!?”. 経済産業省 資源エネルギー庁. <<http://www.enecho.meti.go.jp/about/special/tokushu/saiene/tyoseiryoku.html>>, (参照 2019-02-20).
- (2) 鈴鹿暁志, ほか. 820 MVA-50 Hz 固定子コイル水素間接冷却方式タービン発電機. 東芝レビュー. 2012, **67**, 7, p.42-45.
- (3) 高橋則雄, ほか. 大容量タービン発電機固定子構造物の3次元電磁界解析. 電気学会回転機研究会資料. 2017, **RM-17**, 130-139, p.43-48.



長倉 謙 NAGAKURA Ken
東芝エネルギーシステムズ(株)
パワーシステム事業部 京浜事業所 設計第二部
電気学会会員
Toshiba Energy Systems & Solutions Corp.



植原 辰已 UEHARA Tatsumi
東芝エネルギーシステムズ(株)
パワーシステム事業部 火力電機技術部
Toshiba Energy Systems & Solutions Corp.



石崎 駿佑 ISHIZAKI Shunsuke
東芝エネルギーシステムズ(株)
パワーシステム事業部 火力電機技術部
Toshiba Energy Systems & Solutions Corp.