

小型・高効率 空気冷却タービン発電機を実現する 冷却・損失解析技術

Loss and Cooling Analysis for Downsized and High-Efficiency Air-Cooled Turbine Generators

加幡 安雄 藤田 真史 垣内 幹雄

■ KABATA Yasuo

■ FUJITA Masafumi

■ KAKIUCHI Mikio

構造が簡単で保守が容易という特長を生かして、空気冷却タービン発電機の適用範囲が拡大している。空気冷却発電機の課題は小型化と高効率化である。

東芝は、機内の空気の風量分布を最適化する固定子鉄心ダクトの不等ピッチ配置と、固定子コイルの損失を最小化する新型巻線技術を開発し、この技術を適用することにより、150 MVA 級発電機の質量低減と高効率化を達成した。

The capacity range of air-cooled turbine generators has been expanded from the standpoints of system simplification and easy maintenance. Two important topics in the field of air-cooled generators are downsizing and loss reduction.

Toshiba has developed a multi-pitch ventilation duct system to optimize air flow distribution in the generator, and a new stator coil structure that minimizes electrical losses in the stator coil. These newly developed technologies have achieved both weight reduction and high efficiency for 150 MVA-class air-cooled turbine generators.

1 まえがき

タービン発電機の冷却方式は、機内に空気を循環させて冷却する空気冷却方式と、水素ガスを循環させる水素冷却方式に大別される。水素ガスは密度が小さく熱容量が大きいいため優れた冷却性能が得られるが、水素ガスを機内に封じ込めるためのシール装置や供給装置などが必要となり、保守点検にも時間がかかる。

空気冷却発電機は、水素冷却機と比較して構造が単純となり、製造コスト、運転性、保守性に優れるが、空気の冷却性能が劣るため発熱密度を低くする必要があり、同じ出力では体格(鉄心外径×鉄心長)が大きくなる。また、水素と比較して密度が大きいいため、空気を通風することによる損失(風損)が増加し効率が悪化する。したがって、空気冷却発電機では冷却の強化と損失の低減が必要不可欠となる。

ここでは、空気冷却発電機の適用拡大を図るために行った冷却強化と損失低減の技術開発の内容と、これらの開発技術を適用した150 MVA 級発電機の概要について述べる。

2 空気冷却機の開発技術の概要

タービン発電機の固定子コイル(以下、コイルと略記)の温度上昇は、発電機の体格を決める最大の要因の一つとなっており、そのためにコイルの冷却の強化と損失の低減が不可欠である。

コイルを効率よく冷却するためには、固定子鉄心(以下、鉄心と略記)ダクトを軸方向に不等配に配置することが有効

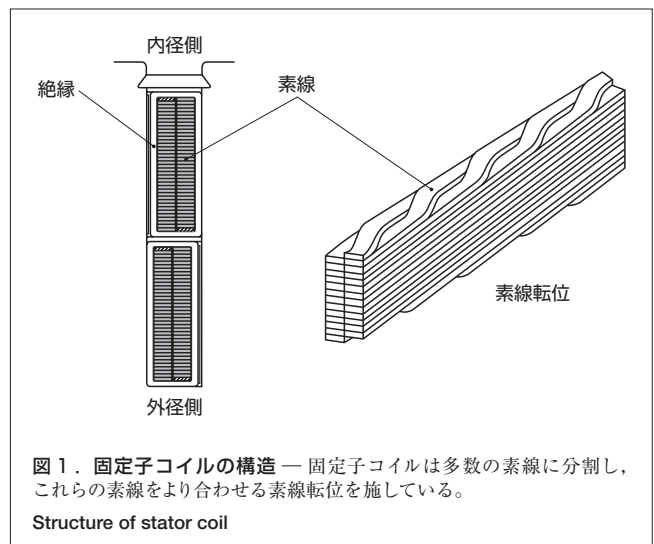


図1. 固定子コイルの構造 — 固定子コイルは多数の素線に分割し、これらの素線をより合わせる素線転位を施している。

Structure of stator coil

である。不等配にダクトを配置にすることによって、コイル温度が低い部位には少なく、高い部位には集中的に冷却ガスを供給し、コイル温度を平準化するとともに、発電機全体の風量を削減して風損を抑えることができる。

コイルには、発電機の漏れ磁束によって渦電流損失及び循環電流損失が発生し、コイル温度の上昇を引き起こす。これらを抑制するため、図1に示すようにコイルを多数の素線に分割し、更に、これらの素線をより合わせる素線転位を施している。

この素線転位は、一般に鉄心内でコイルに鎖交する漏れ磁束を打ち消し合うように設計されるが、鉄心ダクトを不等配に配置した場合はこのバランスが失われ、素線間に循環

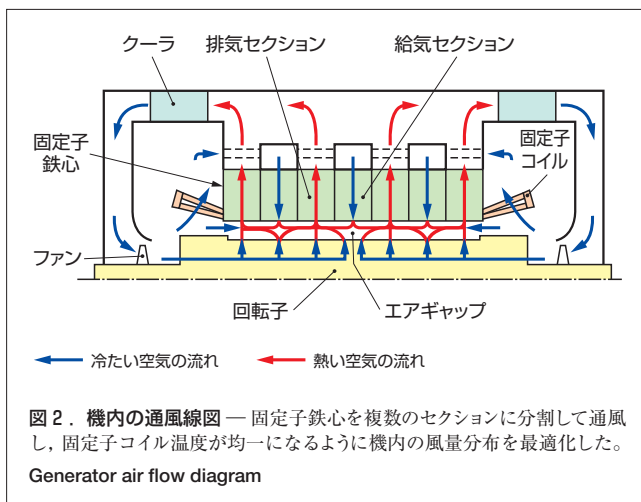
電流が流れて損失が増加する。また、この循環電流は各素線によって異なるため、コイル内に損失分布が生じ、局所的な過熱の原因となる。

そこで、素線転位角度を最適化して素線間に生じる循環電流を低減する技術を開発し、鉄心ダクトの最適配置と合わせて、発電機の冷却強化と損失低減を実現した。

3 固定子コイルの冷却強化と損失低減

3.1 通風・冷却解析

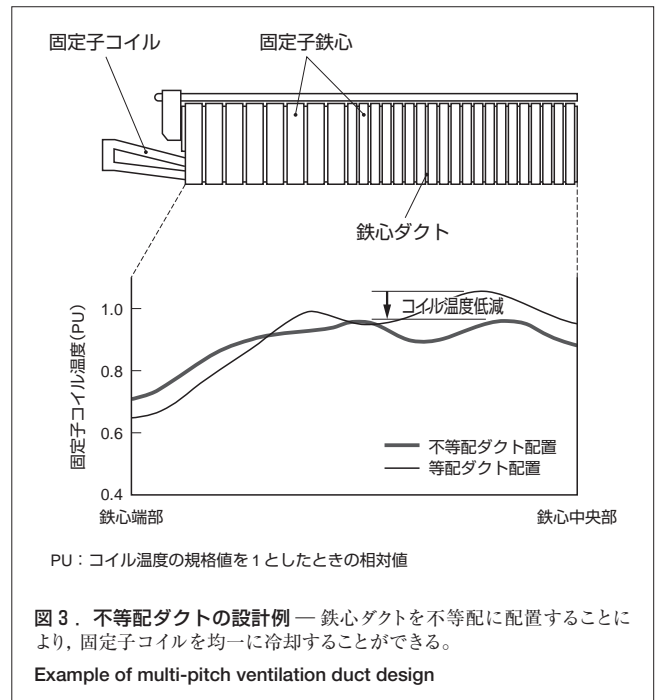
3.1.1 鉄心ダクトの不等ピッチ配置 空気冷却発電機の通風線図を図2に示す。機内の通風は回転子端部に取り付けたファンにより行う。コイル及び鉄心は、鉄心に多数の通風ダクトを設け、空気を半径方向に流して冷却する。



これらの通風ダクトは、軸方向にいくつかのセクションに分割し、鉄心外径側から内径側のエアギャップに向かって流れる給気セクションと、エアギャップから鉄心外径側に通風する排気セクションを構成する。そして、これらのセクション配分を調整し、コイル温度を制限値に抑えながら全体の風量分布を最適化する。

ファンから直接エアギャップに流入する冷却空気は、そのほかの部位と比較して温度が低く、冷却上有利である。したがって、図3に示すように、鉄心端部側のダクトのピッチを大きくし、鉄心中央にダクトを集中的に配置する不等配ダクト配置を採用することで、コイル温度のピーク値を下げ、均一化することができる。

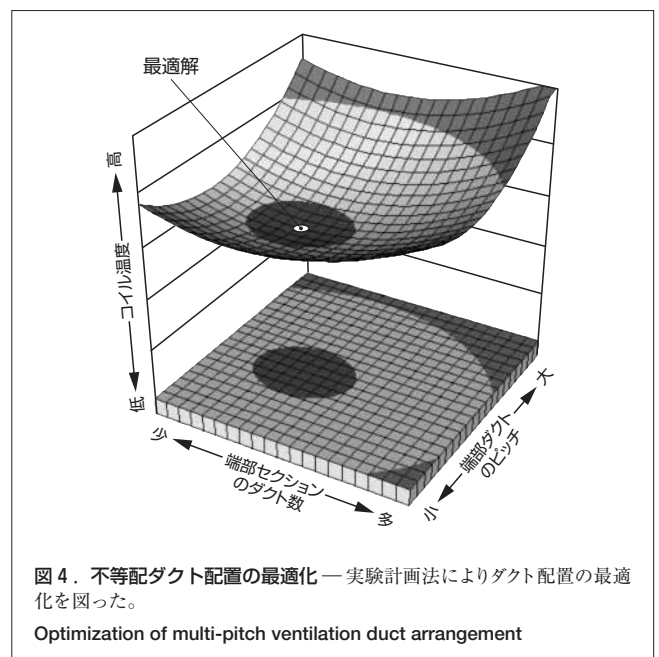
3.1.2 ダクト配置の最適化と風量の抑制 通風路の設計において、各給気・排気セクション内のダクト数と、ピッチの大きい端部側のダクトピッチ及び数をパラメータとし、実験計画法を用いて、コイルの最高温度がもっとも低くなるように鉄心ダクトの配置を最適化した。

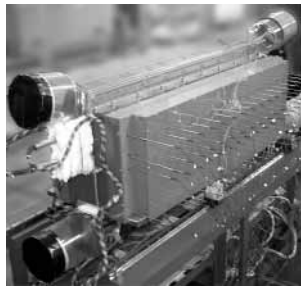


鉄心端部のダクトピッチと端部セクションのダクト数を変化させた場合の、コイル温度の最適化例を図4に示す。

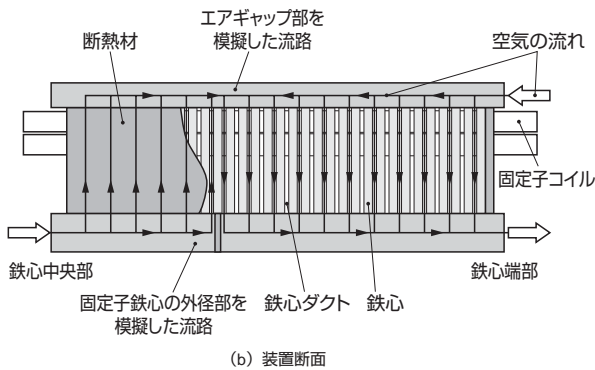
このような複雑なパラメータサーベイを実施した結果、等配ダクト配置の場合と比較して風量が抑制でき、約30%の風損低減が可能となった。

また、風量抑制のためには、精度よく各部の風量分布を求めることが重要である。そこで、図5に示した鉄心1スロットを模擬した通風冷却試験を実施し、風量分布及びコイル温度分布の予測精度の向上を図った。





(a) 装置外観



(b) 装置断面

図5. 通風冷却試験装置 — 鉄心ダクト風量分布の信頼性を評価した。
Ventilation and cooling test equipment

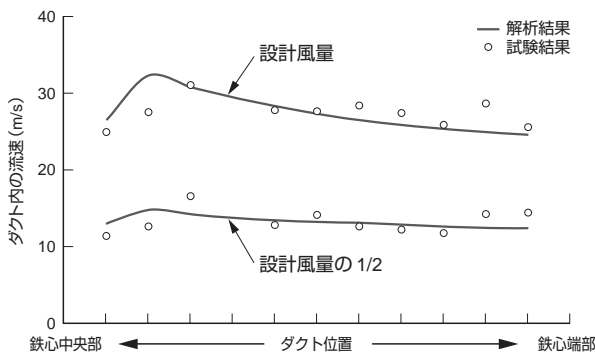


図6. ダクト流速分布の測定結果 — 風量分布の妥当性を確認した。
Gas velocity distribution of stator ventilation ducts

測定結果の一例として、風量を変化させた場合のダクト内の流速分布を図6に示す。測定値は解析値とよく一致しており、風量分布を精度よく推定できることを確認した。

更に、発電機内を模擬した1/2縮小モデルを用いて、機内の空気の流量や圧力、温度及びコイルの温度分布を詳細に測定し、通風・冷却設計の妥当性を確認している。

3.2 損失解析

3.2.1 素線転位角度の最適化による固定子コイル損失の低減 図1に示したように、コイルは多数の素線から構成され、これらの素線をより合わせる素線転位を施している。

コイル断面内の各素線の位置は、転位を行うことによってコイルの軸方向で変化する。比較的鉄心長の短い空気冷却発電機では、鉄心内部で素線位置が1回転し、両鉄心端部で素線位置が同じとなる360°転位を採用することが多い。

固定子鉄心ダクトを軸方向に不等配に配置した場合、鎖交磁束のバランスが失われて不平衡電圧が生じ、素線間を循環電流が流れて損失が増加し、コイル内に大きな損失分布が生じる。コイル内の素線損失分布の解析結果の一例を図7に示す。この解析では、360°転位を素線に施すと、最大で直流抵抗損失の約7倍もの損失が発生する。

新型巻線では、鎖交磁束がバランスするように転位角度を最適化することにより、コイル内の損失分布の平準化を図った。図7の解析例の場合、転位角度を360°より小さくすることによって、コイル内の損失分布が直流抵抗損失の約1.4倍まで低減した。

また、コイルの損失に関しても、図8に示したように、転位

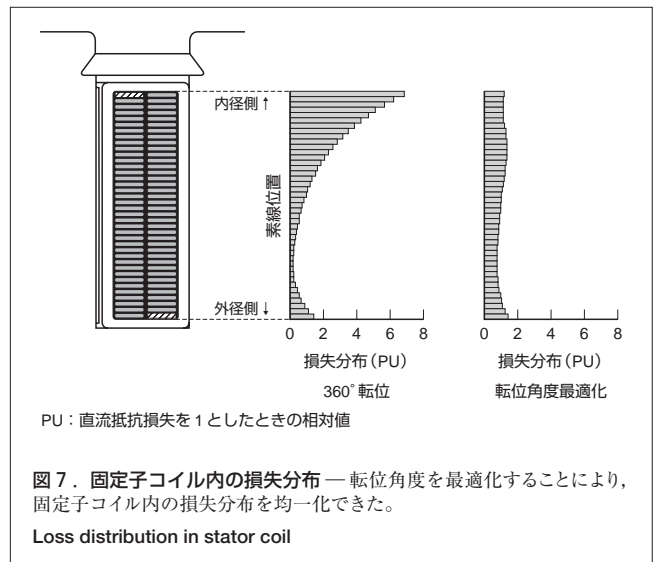


図7. 固定子コイル内の損失分布 — 転位角度を最適化することにより、固定子コイル内の損失分布を均一化できた。
Loss distribution in stator coil

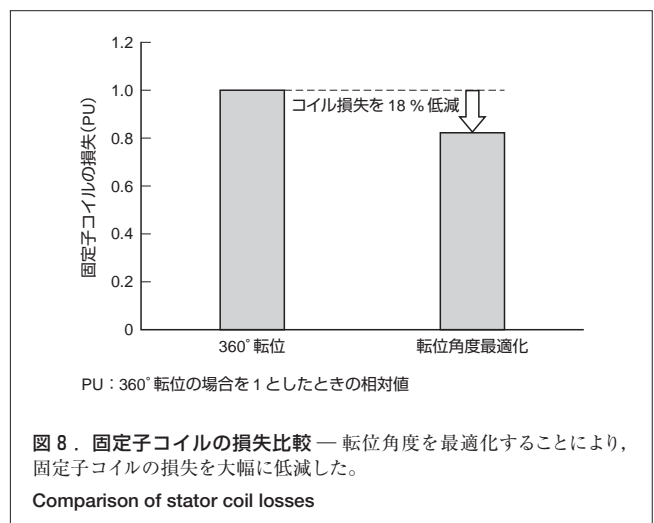
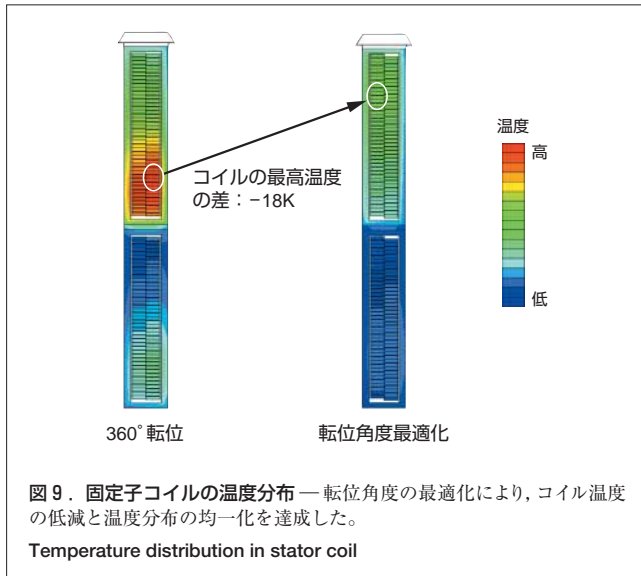


図8. 固定子コイルの損失比較 — 転位角度を最適化することにより、固定子コイルの損失を大幅に低減した。
Comparison of stator coil losses

角度の最適化によって 360° 転位の場合と比較して 18% も低減することができた。

このように、素線の転位角度を最適化することによって、コイル内の損失分布を平準化するだけでなく、損失自体も大幅に低減することができ、この技術は空気冷却機の高効率化に有効な手段であることが確認できた。

3.2.2 固定子コイルの温度分布 360° 転位の場合と転位角度を最適化した場合の、コイル断面内温度分布の比較を図9に示す。



転位角度を最適化した場合、コイルの損失が低減したことによりコイルの最高温度が18K下がった。また、360° 転位ではコイル内に20Kもの温度差が生じていたが、損失分布平準化の効果により、転位角度を最適化したコイルでは9K以内にまで低減した。

コイル最高温度及びコイル内の温度差の低減は、コイル絶縁の熱劣化防止に重要であり、この技術の適用により、固定子コイルの信頼性を向上することができた。

4 150 MVA級 空気冷却発電機への適用

これらの開発技術を適用した、150 MVA級の空気冷却発電機を2005年4月に出荷した。出荷前に行った工場試験では、特性試験、損失測定、温度上昇試験及び振動・過速度試験を実施し、いずれの試験も仕様及び規格を満足し良好な結果が得られた。

開発機と従来機との比較を表1に示す。従来機と比較して総質量を18%削減するとともに、効率を0.07%向上することができた。

表1. 150 MVA級 空気冷却発電機の性能比較

Performance comparison of 150 MVA-class air-cooled turbine generators

項目	仕様及び性能	
	開発機	従来機
容量 (MVA)	155	150
周波数 (Hz)	60	60
力率	0.9	0.9
出力係数 (PU)	1.08	1
総質量 (PU)	0.82	1
効率 (%)	98.75	98.68

PU：従来機を1としたときの相対値

5 あとがき

空気冷却タービン発電機の小型化と高効率化を達成するうえで必要不可欠となる冷却強化と損失低減の技術を開発し、これらを150 MVA級 空気冷却発電機に適用して大幅な質量低減と高効率化を実現した。

今後は、より大容量の発電機への展開を図り、空気冷却発電機の適用容量を拡大するとともに、いっそうの高性能と高信頼性を目指していく。



加幡 安雄 KABATA Yasuo, D.Eng.

電力・社会システム社 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、工博。回転電機の通風冷却技術の開発業務に従事。日本機械学会会員。

Power and Industrial Systems Research and Development Center



藤田 真史 FUJITA Masafumi

電力・社会システム社 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。回転電機の電磁気技術の開発業務に従事。電気学会会員。

Power and Industrial Systems Research and Development Center



垣内 幹雄 KAKIUCHI Mikio

電力・社会システム社 京浜事業所 発電機部主務。タービン発電機的设计・開発に従事。電気学会会員。

Keihin Product Operations