

中国 満州里向け 235.5 MVA 空気冷却発電機完成

Shipment of 235.5 MVA Air-Cooled Generator for Manzhouli Project, PRC

斉藤 一正

■ SAITO Kazumasa

垣内 幹雄

■ KAKIUCHI Mikio

藤田 真史

■ FUJITA Masafumi

中国の哈尔滨電機廠有限責任公司 (Harbin Electric Machinery Co.,Ltd.)と共同で進めている中国 満州里プロジェクト向け発電機は、東芝が持つ固定子の通風最適化や固定子コイルの素線転位などの最新技術を適用することにより、従来の空気冷却機と比較して大幅なコンパクト化と高効率化を実現した。当社で設計及び製造を行い、工場試験でその性能を実証した後、2006年6月に出荷した。

Toshiba shipped an advanced air-cooled generator for the Manzhouli Project in the People's Republic of China (PRC) in June 2006. This project has been advanced with Harbin Electric Machinery Co., Ltd. The generator features downsizing and higher performance in comparison with conventional air-cooled generators. The latest technologies were used in its design and manufacturing, and it has been confirmed to have successfully achieved the design specifications.

1 まえがき

最近、経済発展が著しい中国では、都市部の熱併給プラント向けに200 MW クラス発電機の需要が見込まれている。東芝は、中国3大重電機メーカーの一つである哈尔滨電機廠有限責任公司(Harbin Electric Machinery Co.,Ltd.)と協同で、深圳投資電力公司満州里プロジェクト向け50 Hz 235.5 MVA 空気冷却発電機2台を2004年9月に受注した。発電機本体の設計及び製造を当社が担当し、工場試験で性能を確認してその1号機を2006年6月に出荷した(図1)。2号機は2006年12月に出荷予定である。

空気冷却方式は、構造がシンプルであるため小容量の発電機で広く採用されているが、大容量機への適用にはコン



図1. 満州里向け発電機 — 満州里向け発電機の工場試験時のようすを示す。

Advanced air-cooled generator for Manzhouli Project

パクト化及び高効率化が課題であった。この発電機では新技術の採用により、従来機と比較して大幅なコンパクト化と高効率化を実現した。

ここでは、この発電機の設計コンセプト、適用された主な最新技術、解析結果並びに性能の検証試験結果について概要を述べる。

2 設計コンセプトと最新技術

2.1 大容量空気冷却発電機の課題

発電機は、出力、経済性、設置場所の条件及び運転性能などを考慮して最適な冷却方式を選択するのが一般的であり、当社では、固定子巻線の冷却方式として空気間接冷却(空気冷却)、水素間接冷却(水素冷却)、水直接冷却(水冷却)の3種類の冷却方式を適用している。空気冷却方式の場合、水素冷却方式や水冷却方式と比較して冷却性能の劣る空気を冷媒として用いるため発電機が大型化し、また、水素と比較して密度の大きい空気を冷媒として用いるため風損が増加し、効率が低くなる傾向がある。

しかしながら空気冷却方式の場合、水素冷却方式及び水冷却方式に必要な水素ガス密封システム、水素ガス・炭酸ガス供給装置、固定子巻線冷却水装置などを必要とせず構造がシンプルとなり、顧客にとっては経済性、運転性、保守性において大きなメリットがあるため需要が多い。

2.2 設計概要

一般的に、発電機容量は次の式で表される。

$$P = k \times D_i^2 \times L_s \times N$$

- P : 発電機容量
- k : 出力係数
- D_i : 固定子鉄心内径
- L_s : 固定子鉄心長
- N : 回転数

発電機単機の容量を増大するためには、出力係数を上げるか、発電機体格($D_i^2 \times L_s$)を大きくする必要があります。しかし、中国国内の内陸輸送における重量や寸法に関する制限を考慮すると大型化には制限があるため、出力係数を大きくすることで発電機容量の増大を図る必要がある。

出力係数(エネルギー密度)は単位体積当たりの容量であり、機器の冷却性能によって決まるため、これを大きくするには冷却性能の向上が必須である。

今回開発した空気冷却機の発電機諸元を表1に示す。

最新技術を適用して出力係数を従来機に比べ約10%改善できたことにより、従来機と比較して、寸法で約95%、重量で約90%のコンパクト化を実現した。

表1. 満州里向けタービン発電機と従来機の比較

Targeted goals of Manzhouli generator in comparison with conventional generators

	満州里向けタービン発電機	従来 当社空気冷却発電機
容量 (MVA)	235.5	220
力率	0.85	0.80
回転数 (min^{-1})	3,000	3,000
発電機外形寸法 (幅×高さ×奥行) (%)	95 × 95 × 93	100 × 100 × 100
重量 (%)	90	100

また、この発電機では顧客要求により、図2に示すように発電機用クーラを発電機の基礎下に配置する構造が採用されている。

冷却性能向上のためにこの発電機に適用した技術の概要を以下に述べる。

2.3 固定子の通風最適化

発電機の固定子コイルは一般的に鉄心軸方向に温度分布があるが、いちばん高い温度を規格許容値以下とするため、温度の不均一は体格大型化の一因となる。そのため、通風の最適化によって温度を均一にすることでコンパクト化を図る。

発電機の固定子コイルは、図3に示すように、基礎下に設置されたクーラによって冷却された空気が機内を循環することで冷却される。

クーラで冷却された空気は回転子両端に取り付けられた

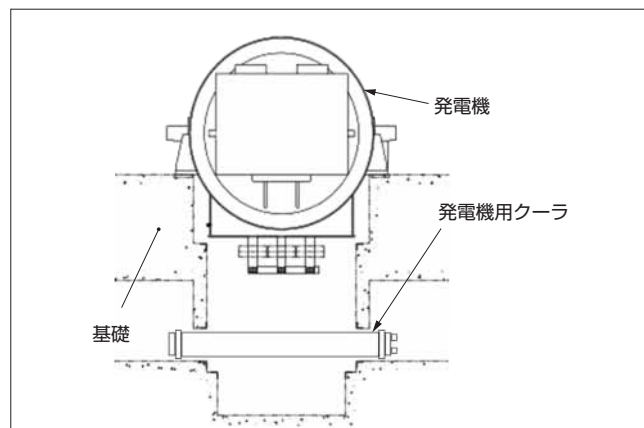


図2. 満州里向け発電機クーラの配置 — この発電機では、顧客要求により発電機用クーラを発電機の基礎下に配置する構造が採用されている。

Unique arrangement of cooling unit in Manzhouli generator

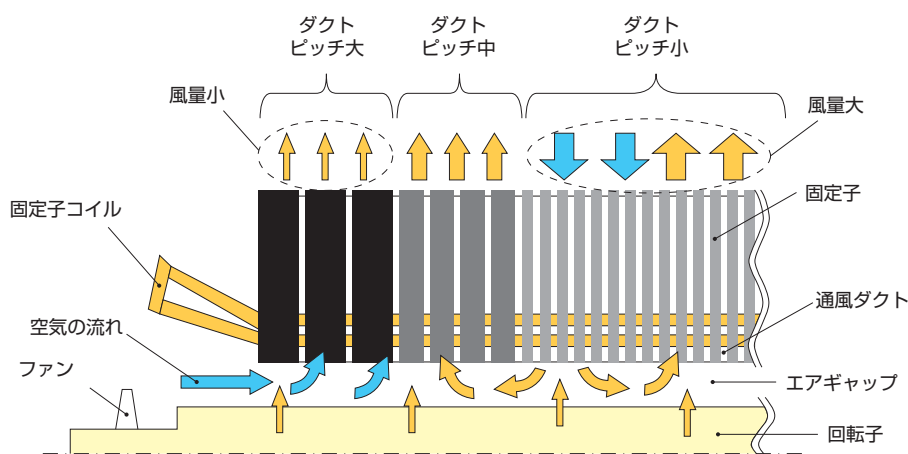


図3. 固定子通風ダクトの構造 — ステータコイルの温度を均一にするようにダクト配置を最適化した。

Ventilation ducting scheme for stator

ファンで機内に供給される。固定子鉄心には通風用のダクトが設けられ、軸方向に複数の冷却空気の吸排セクションを形成している。固定子コイルはダクトを流れる空気冷却されるが、ダクトを流れる空気の温度が鉄心軸方向でばらついて影響で、固定子コイルの温度のばらつきが生じる。

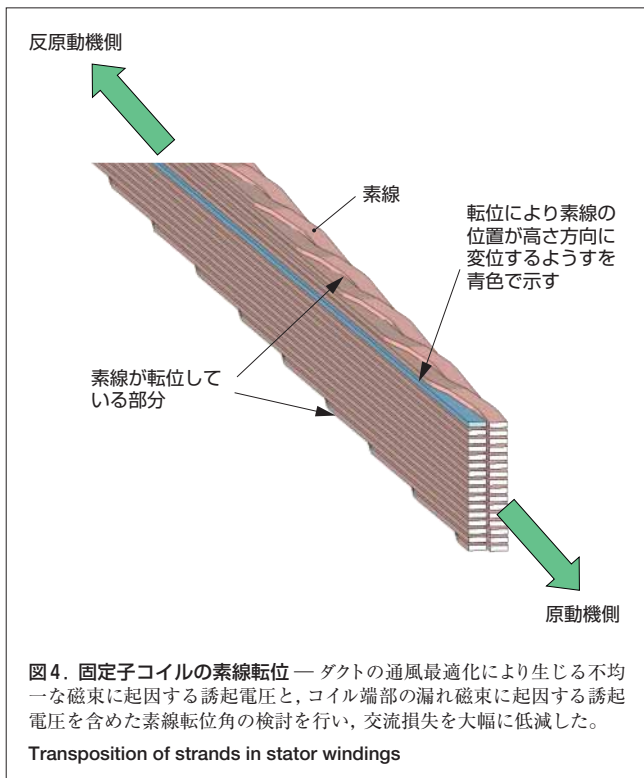
このようなばらつきを小さくするため、図3に示すように、ダクトピッチを多段階に設定し、端部側の通風ダクトに流入する空気流量と中央部の通風ダクトに流入する空気流量の割合の最適化を行った。このような最適化は、後述の新コイル構造の適用により、通風ダクト配分の自由度が増したことで可能になった。

2.4 固定子コイルの最適化

固定子コイルの損失は直流損失と交流損失の和である。

固定子コイルは、それぞれ絶縁の施された素線により構成される(図4)。固定子コイル中の各素線が異なる磁束を受けることによる影響を小さくする目的で、軸方向に沿って各素線の高さを変位させる“レーベル転位”を行うのが一般的である。当社では通常、空気冷却発電機に対して、固定子鉄心の両端の間でそれぞれの素線の変位が一巡する360°転位を採用してきた。しかし、この転位で完全にバランスできる磁束は鉄心が均一な場合の磁束であり、前述のように、ダクトピッチを段階的に変更することによって生じる不均一な磁束や、コイル端部の漏れ磁束をバランスさせることはできない。

この発電機のコイルは、素線の転位角度を最適化すること

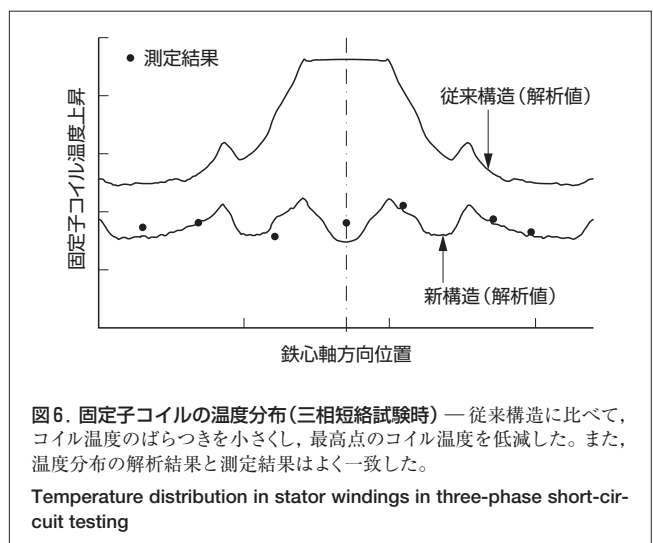
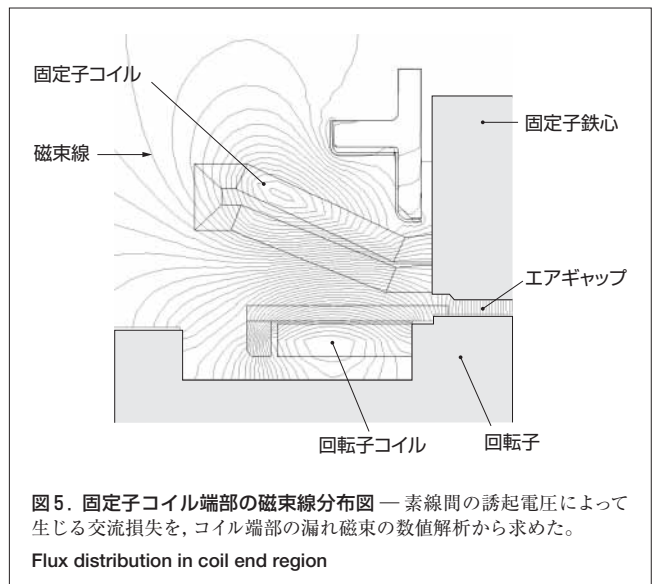


で素線間に交差する磁束をバランスさせ、交流損失の低減を図った。ダクトの通風最適化で生じる不均一な磁束に起因する誘起電圧と、コイル端部の漏れ磁束に起因する誘起電圧を考慮した数値解析(図5)により、交流損失を大幅に低減し、固定子コイル損失を従来構造のおよそ2/3にすることができた。

工場試験におけるコイル温度測定結果の軸方向分布を、解析結果とともに図6に示す。測定結果の温度分布は、解析結果とよく一致した。従来構造に比べて、コイル温度のばらつきを小さくできたため、コイル最高温度を著しく低下させた。

2.5 その他の適用技術

鉄心の支持構造は実績のある弾性支持構造を採用し、鉄心は小型・高効率化のため方向性けい素鋼板を採用している。運転時のスロット内電磁力に対する固定子コイルのスロット内での固定には、固定子コイルと鉄心の間にサイド



リップスプリングを設置し、また、テーパくさびを採用した。また、固定子コイルのエンド支持構造には、運転時のコイル熱伸びを吸収するスライド機構を備えている。

回転子コイルの通風冷却は、ラジアルフロー冷却方式を採用するとともに、回転子断面設計を最適化して回転子コイルの断面積を大きく確保し、損失を低減して回転子コイルの温度を抑制した。

3 工場試験結果

2006年5月に、当社京浜事業所で発電機の無負荷特性試験、損失測定試験、温度上昇試験、三相突発短絡試験、及び過速度試験を実施し、性能を確認した。その工場試験のようすは図1のとおりである。

試験結果は、仕様及び規格を満足し、良好であった。主な試験結果を以下に述べる。

- (1) 無負荷特性試験 発電機の無負荷定格電圧時及び三相短絡定格電流時の界磁電流を確認した。また、短絡比は仕様を満足した。
- (2) 損失及び効率 各部の損失を測定し、IEC60034-2規格(国際電気標準会議規格60034-2)に従って規約効率を算定した。効率は、保証効率98.77%以上の良好な結果を得た。
- (3) コイル温度上昇 等価温度上昇試験法による試験を行い、定格負荷時の各部の温度上昇を推定した。結果は、固定子コイルと回転子コイルのほか、各部の温度上昇は規格値を満足し、良好なものであった。
- (4) 軸振動 定格速度及び120%過速度試験において、回転子振動を確認し、良好な結果を得た。
- (5)リアクタンス 発電機の三相突発短絡試験を実施して発電機のリアクタンスを測定した結果は、設計値とよく一致した。

このように、この発電機は各種の試験により良好な性能確認ができたので、2006年6月に1号機として出荷された。

4 あとがき

当社は、2極50 Hz 空気冷却としては最大容量機である235.5 MVA 発電機を設計、製造、出荷した。今後、ここで適用した技術を更に発展させ、空気冷却発電機のよりいっそうの大容量・高効率化を目指す。

ここで検証できた技術を用いて、300 MW 級発電機への空気冷却方式の適用が可能となった。

文 献

- (1) 加幡安雄, ほか. 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. 東芝レビュー. 60, 8, 2005, p.40-43.
- (2) 藤田真史, ほか. “大容量タービン発電機固定子コイルの循環電流損失と素線転位方式の検討”. 電気学会回転機研究会資料. 北九州, 2005-10. RM-05-145.



齊藤 一正 SAITO Kazumasa

電力システム社 火力・水力事業部 火力タービン・発電機技術部。火力発電所の電気系システムエンジニアリング業務に従事。

Thermal & Hydro Power Systems & Services Div.



垣内 幹雄 KAKIUCHI Mikio

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

Keihin Product Operations



藤田 真史 FUJITA Masafumi

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。回転電機の電磁気技術の開発業務に従事。電気学会, IEEE 会員。

Power and Industrial Systems Research and Development Center