

世界最高水準の高効率・低騒音を実現した 空気冷却発電機「GH1550A」

High Efficiency and Low Noise Air-cooled Turbine Generator "GH1550A"

柿本 忠昭 Tadaaki Kakimoto

府金 圭二 Keiji Fugane

高橋 和彦 Kazuhiko Takahashi

服部 憲一 Kenichi Hattori

前 浩之 Hiroyuki Mae

岩重 健五 Kengo Iwashige



図1 工場試験時(左)と、発送に向けて場内クレーンで移動中(右)の「GH1550A」
空気冷却発電機「GH1550A」は、工場回転試験など、さまざまな試験を行い、性能や設計の妥当性を検証した。

日立製作所は、世界最高効率と低騒音を実現した空気冷却発電機「GH1550A」を完成し、1号機から5号機を出荷した。

GH1550Aは、空気冷却発電機でありながら、発電機定格効率98.75%(60 Hz, PF0.85)、98.77%(50 Hz, PF0.8)、発電機単体での騒音値77 dBA(60 Hz)、74 dBA(50 Hz)という世界最高水準の性能を達成した発電機である。この性能を達成するため、ネットワーク通風解析やステータコア電磁解析を用いて徹底的な損失低減を行った。また、さまざまな騒音試験結果を基に、最適な遮音が可能となる防音構造を開発し、適用した。

さらに、ロータ振動解析、温度解析、各部応力解析などの解析技術も駆使し、性能や信頼性の向上に努めた。

工場回転試験では、効率、騒音、温度上昇、軸振動など、各試験において設計仕様を満たすことを確認した。

1.はじめに

近年、国際的な電力需要の伸びにより、発電設備の新設や発電設備の出力増が行われており、地球環境の保護といった観点から発電設備の高効率化や低騒音化が要求されてきている。

その中で、日常負荷平準化の目的でピーク時間のみに使用されたり、自家発電として使用される100 MW近傍の発電機出力の場合、操作が簡易で保守費用が安価という理由から、しばしば空気冷却発電機が採用されてきた。

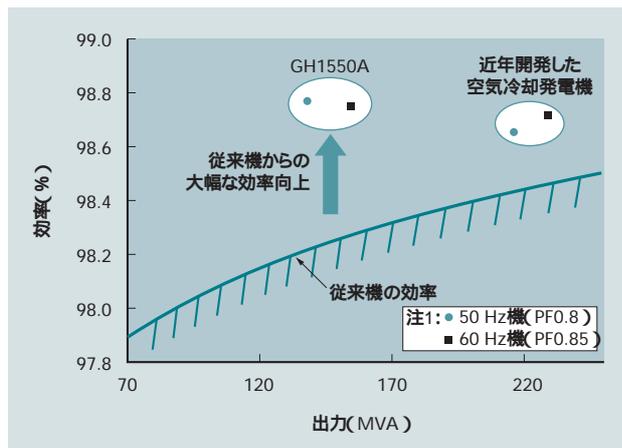
一般的に空気冷却発電機は水素冷却発電機に比べ、構造や冷却媒体の関係から騒音が大きくなる問題がある。また、効率も水素冷却発電機より低く、100 MW近傍の空気冷却発電機では98.0%程度であるのが一般的であった。

日立製作所は、発電機の高効率化や低騒音化に注力してきており、今回、世界最高水準の高効率と低騒音を実現した空気冷却発電機「GH1550A」の開発を完了した(図1参照)。

GH1550Aは定格効率98.75%(60 Hz, PF(Power Factor))

2007年11月20日現在、日立製作所調べ

0.85), 98.77% (50 Hz, PF0.8), 発電機単体での騒音値77 dBA (60 Hz), 74 dBA (50 Hz) という空気冷却発電機としては世界最高水準の性能を達成している(図2, 図3参照)。これは, 100 MWの発電機にて損失の38%(770 kW)を, 騒音では18 dBAを低減したことに相当する。GH1550Aの諸元を表1に示す。



注2: 略語説明 PF(Power Factor)

図2 GH1550Aと従来機の効率比較

GH1550Aは従来機に比べて0.5ポイントの効率向上を実現した。近年開発した空気冷却発電機⁵⁾⁶⁾の効率は, 図中記載の力率で運転した場合の換算効率である。

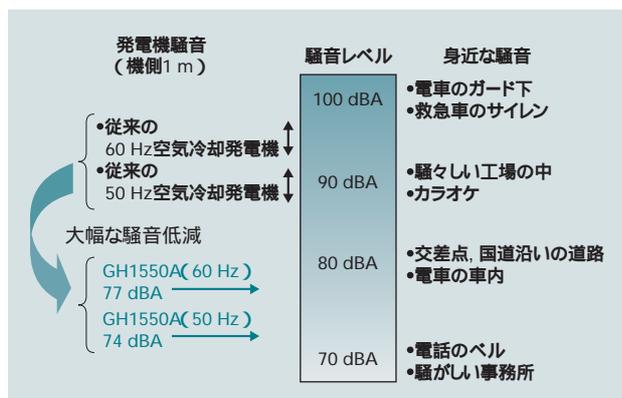


図3 GH1550Aと従来機の騒音比較

GH1550Aは従来機に比べて18 dBAの騒音低減を実現した。

表1 GH1550Aの諸元

空気冷却発電機GH1550Aの諸元を示す。

項目	諸元	
出力	136 MW	110 MW
電圧	13.8 kV	11.5 kV
短絡比	0.5	0.5
力率	0.85	0.8
回転速度	3,600 rpm	3,000 rpm
絶縁種別	class F	class F
温度上昇	class B	class B
効率	98.75%	98.77%
適用規格	ANSI C50.14	IEC60034-1
騒音	77 dBA	74 dBA
冷却方式	全閉型 または 開放型	
質量	発電機本体160 t以下	

ここでは, 効率, 騒音の両面に関し, 従来の水素冷却発電機を凌駕(りょうが)した空気冷却発電機「GH1550A」に適用した技術について述べる。

2. GH1550Aの技術的課題

GH1550Aの技術的課題を表2に示す。

発電機は図4に示す構造をしており, タービンの回転エネルギーを電気エネルギーに変換する。つまり, 回転子が回転することによって発生する変動磁場を, 固定子鉄心に巻いた電機子巻線を通して電流と電圧の形で外部に取り出している。発電機は高磁場, 大電流で運転されており, 導体に電流を流すことで生じる銅損や, 鉄心に磁束を通すことで生じる鉄損, その他の電気損などが機内各部で発生する。

また, 損失によって発生する熱を冷却するために, 回転子軸端にはファンを設け, 冷却風を機内に循環させている。機内を循環させる風量は30 m³/sを超え, 回転子の最大周速は約200 m/sとなる。したがって, この通風のためのファンや回転子周速による通風損, 摩擦損は大きく, 冷却するために新

表2 GH1550Aの技術的課題

GH1550Aの技術的課題をまとめて示す。

設計課題	通常対策方法	問題点
高効率化	電気損の低減 ●最適な導体寸法とする。 ●低損失な電磁鋼板を採用する。	●導体寸法が小さいと銅損が増加する。 ●導体寸法が大きいと漂遊負荷損が増加する。 ●低損失電磁鋼板は汎用の電磁鋼板より入手性が悪い。
	通風損, 摩擦損の低減	●通風量の低減 ●発電機の冷却能力の低下につながる。
低騒音化	遮音量の増加 ●ステータフレームの板厚増加	●重量の増加につながる。

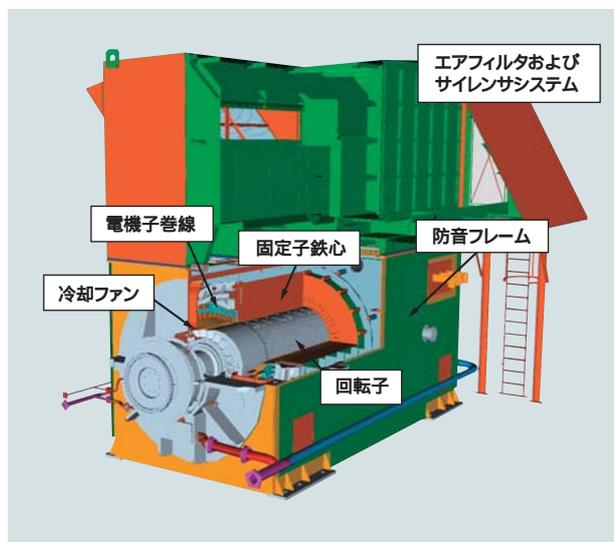


図4 開放型の空気冷却発電機GH1550A
開放型GH1550Aの構造を示す。

たな損失が発生していることになる。

高効率化のためには、これらの損失を低減することが必須である。銅損は導体寸法を大きくすることにより、鉄損は固定子鉄心を大きくしたり低損失な電磁鋼板を採用したりすることで低減することができる。しかしながら、導体寸法や鉄心を大きくする対策ではマシンサイズが大きくなり重量も増加してしまう。低損失な電磁鋼板は入手性が悪く納期に影響を与える可能性が高い。したがって、いかにマシンサイズを維持し、汎用の電磁鋼板を適用できるかが重要となる。

通風損や摩擦損は、通風量を減らすことによって低減することができる。通風量は、機内温度や損失による発生熱量により決定される。したがって、効果的な冷却ができる構造とすることや、銅損や鉄損などの電気損を低減して発生する熱を減らし、通風量を低減することが重要となる。

低騒音化を実現するためには、ステータフレーム板厚は厚いほうが有利ではある。しかしながら、全世界的な鉄材の不足や輸送重量といった観点からは薄肉化が望ましい。そこで、図5に示すステータフレームの解析モデルを用いて、振動や強度などの解析を行い、回転子を含む発電機本体部分の質量が最低限となるように構造の最適化を行った。したがって、薄肉化したステータフレームにて十分に騒音を低減できる防音構造が必要となる。

3. 高効率化のための低損失設計

3.1 効率的な冷却のための通風設計

空気冷却発電機に特有の通風に関して以下に述べる。

大型の発電機では、密度と粘性が低く、冷却能力の高い水素を冷媒としている。密度、粘性が低いことから回転子の周速にもかかわらず、表面で発生する摩擦損が小さく、冷却効率がよいことから冷却風量も抑えることができ、ファン動力も

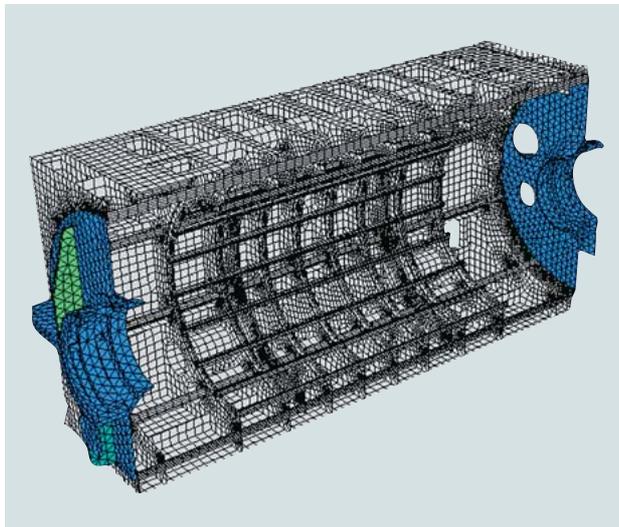


図5 ステータフレームの解析モデル
ステータフレーム全体をモデル化し、振動や強度解析を実施した。

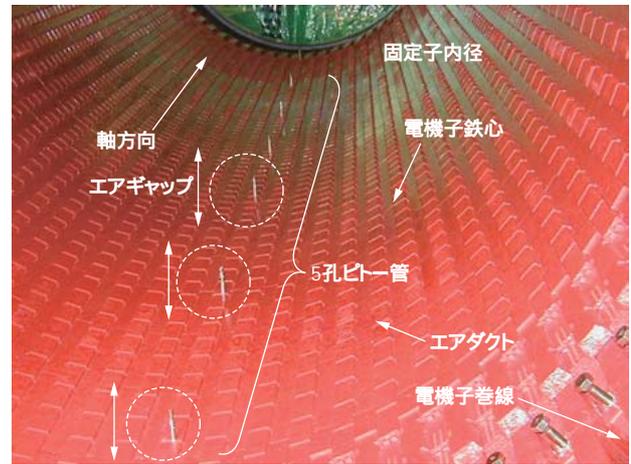


図6 実機での通風センサー配置の状況
通風センサーをエアギャップに設置し、通風分布を測定した。

抑えられる。一方、冷媒としての空気は密度、粘性が高く、冷却能力が小さいため、発電機性能を決める支配的な損失となる。表面摩擦損を低減するためには回転子径を下げ、周速を下げる必要があり、通風損を低減するには、ファンの圧力、通風量を小さくする必要がある。しかしながらどちらも発電機冷却に悪影響を及ぼすため、通風損や摩擦損を低減するには発電機内の損失を小さくするとともに効率的な冷却が必須となる。

効率的な冷却を実現するためには、発電機各部の通風分布の把握が必要である。従来、固定子のエアダクトやファン周りの冷却風に関する三次元解析や測定により、通風設計のデータベースを構築してきた。その中で、エアギャップでの通風、摩擦損と風量分布が固定子温度分布の大部分を決めることが明らかになってきたため、1998年ごろからエアギャップの温度分布を測定するようになり、2002年には実機のエアギャップで通風測定を実施した。実機での通風分布測定の様子を図6に示す。同図は、固定子を内径側から見たもので、固定子鉄心の外周からエアギャップに向けて風速センサー（5孔ヒトー管）を配置した様子である。5孔ヒトー管は、風速を三次元のベクトルとして測定できるセンサーである。定格回転数までの各回転数で、風速ベクトルを求め、エアギャップ内の風量分布を測定した。

この測定により、エアギャップを流れる冷却風と、エアギャップから固定子のエアダクトへ流れる冷却風を定量的に評価できるようになり、発電機の通風設計技術が飛躍的に進んだ。

通風摩擦損は、発電機の出力にかかわらず一定となるため、この損失を低減することにより、全出力に対する効率を改善することができる。

3.2 電気損の低減

電気損としては、固定子、回転子で発生する銅損（いわゆる

るI²R損と、漂遊負荷損、および固定子鉄心で発生する鉄損がある。

銅損は巻線の断面積、つまり銅を増やすことで低減できる。ただし、単に断面積を増やすだけでは重量の増加につながるため、大幅な銅損の低減は難しい。

また、漂遊負荷損については、磁場にさらされる導体寸法を小さくすること、鉄損については低損失な電磁鋼板を使用することである程度の低減は可能である。しかし、漂遊負荷損と鉄損については、定量的な評価をすることが難しいため、電磁界解析を用いて損失を評価する。

発電機の損失計算モデルを図7に示す。発電機全体を三

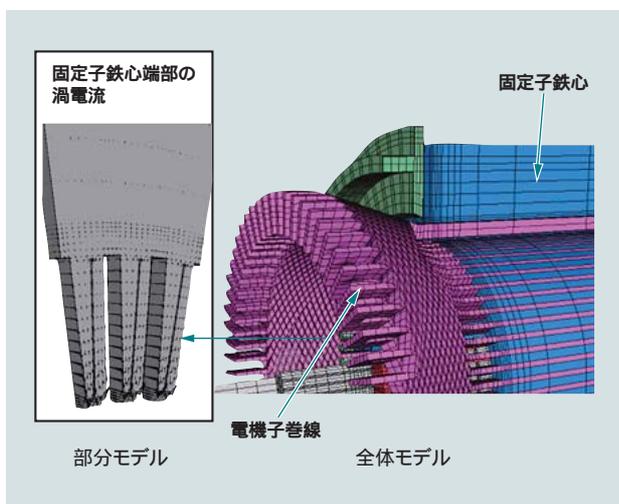


図7 発電機の損失計算モデル
発電機全体の三次元モデルを用いて、各部の電磁界と損失を解析し、細かい部分は局所部分モデルで解析を行う。

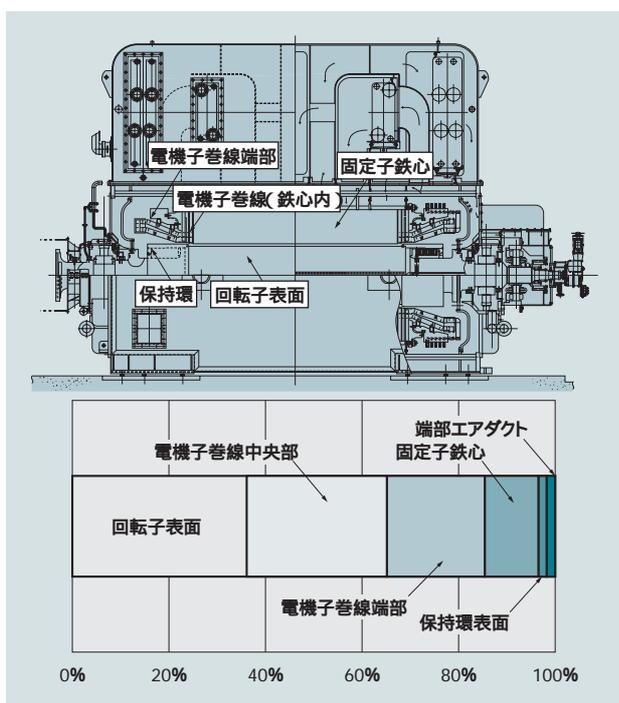


図8 漂遊負荷損の内訳
発電機の漂遊負荷損の内訳を示す。

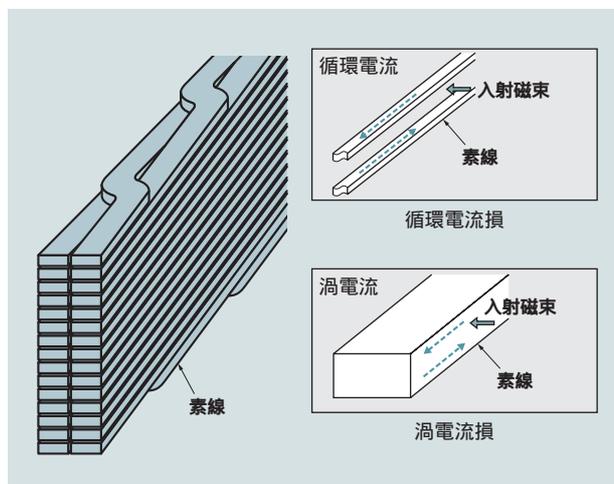


図9 電機子巻線の損失低減
素線どうしをより合わせ、素線も細分化させることで損失低減を行う。

次元でモデル化し、各部の電磁界と損失を計算する。全体モデルで計算した電磁界分布を境界条件として、さらに細かい部分をモデル化し、詳細に損失計算する。これにより、漂遊負荷損がどの部分で発生しているかを分析し、各部に応じた損失低減策をとる。

漂遊負荷損の発生位置とその内訳を図8に、このうちの大部分を占める電機子巻線の漂遊負荷損低減方法を図9にそれぞれ示す。電機子巻線内で発生する漂遊損は、さらに、素線間を循環して流れる循環電流損と、素線内に局所的に発生する渦電流損に分けられる。循環電流損は素線転位、つまり素線どうしをより合わせることで素線間に鎖交する磁場を相殺することで低減し、渦電流損は素線を細分化することで低減する。素線の段数や高さは銅損と漂遊負荷損の合計が最低になるように選択する。

鉄損についても漂遊損と同様、発生メカニズムと発生部位を詳細に分析した。必ずしも低損失の鉄心材料を使用すれば期待通りの損失低減効果が得られるわけではなく、鉄心内に配置する冷却用のエアダクト構造や、その他構造物などで付加的に発生している損失があることがわかったため、これを考慮して低損失化を図った。

4. 低騒音型ステータフレームの設計

4.1 発電機の騒音源

発電機的主要な騒音源としては、電磁振動音、流体による空力音、回転子と軸受の摺(しゅう)動音がある。

電磁振動音は、変動磁場により固定子鉄心や電機子巻線が振動する際に発する騒音である。この電磁振動による騒音は、固体伝播(ば)音としてステータフレームへ伝わり、騒音源となる。2極のタービン発電機では、1回転に2回の電磁振動が生じるため、この振動周波数は回転周波数の約2倍となる。

次に、流体による空力音は、回転子軸端に取り付けられる

ファンや、回転子自身の回転、発電機内各部を冷却風が流れることによって発生する音である。発電機は各種損失によって熱を発生するため、回転子端部のファンにて機内流体を循環させている。このため、ファン回転の風切りと、同時に、冷却風が発電機内を流れることによる空力音が生じる。回転子自身も回転による空力音を生じる。

回転子と軸受の摺動音は、摺動による固体伝播音である。すなわち、摺動による振動が伝播して騒音となっており、この振動周波数は回転周波数と同じとなる。

4.2 発電機の内部騒音

ステータフレームの防音設計を行うにあたり、発電機の音源や内部騒音周波数は重要なパラメータとなる。これらは、発電機の内部構造や寸法に大きく影響を受けるため、発電機の機種ごとに異なることが考えられる。

そこで、GH1550Aの防音設計のために、類似発電機の機内における内部騒音を詳細に測定した。

4.3 モックアップモデルによる騒音試験

類似発電機から得られた内部騒音を基に、電磁振動音とファンによる空力音に対して効果的な防音が可能構造を検討し、モックアップモデルにより、それらの遮音性能を確認した（[図10](#)参照）。

防音構造は、フレーム外壁の材質や厚み、フレームと外壁の空間に詰める吸音材の材質や厚み、密度、外壁の保持や固定方法などにより、周波数全域での遮音性能や周波数ごとの遮音性能が大きく変わることが確認できた。構造によっては、フレーム外壁を設けたにもかかわらず、その効果がほとんどない場合や、特定周波数の遮音性能が著しく悪化してし

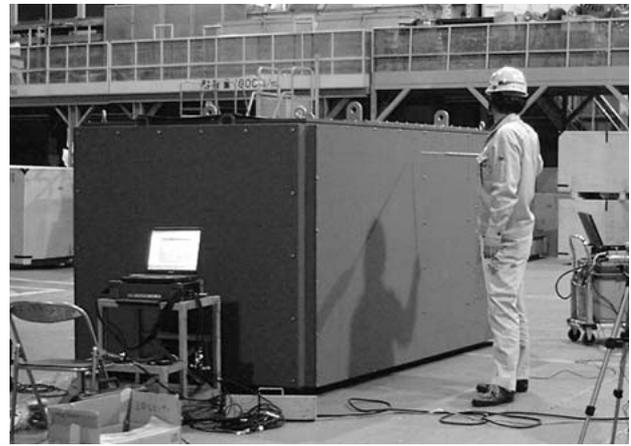


図10 モックアップモデルによる騒音試験の風景
さまざまな形状の防音壁の遮音性能を検証した。

まうコシデンス効果により、発電機内部騒音の周波数を考えた場合、フレーム単体では遮音性能が劣ってしまう場合があることも確認できた。

5. 組立試験での効率と騒音の測定結果

5.1 発電機の効率

60 Hz, 136 MW, PF 0.85では効率98.75%, 50 Hz, 110 MW, PF 0.80では効率98.77%（共に、励磁機損失を含む。）であり、当該出力での空気冷却発電機として世界最高効率を達成した。特に、50 Hz, PF 1.0での運転では99.0%を超える高効率を達成した（[図11](#)参照）。

GH1550Aは50 Hz/60 Hz共用設計としているため、効率値は上記にとどまっているが、50 Hz, 60 Hzそれぞれで最適設計をすれば、さらに高効率を実現することも可能であり、また、冷ガス温度が高い場合に出力は若干下がるが、ファンを変更することでさらなる高効率が達成可能である。

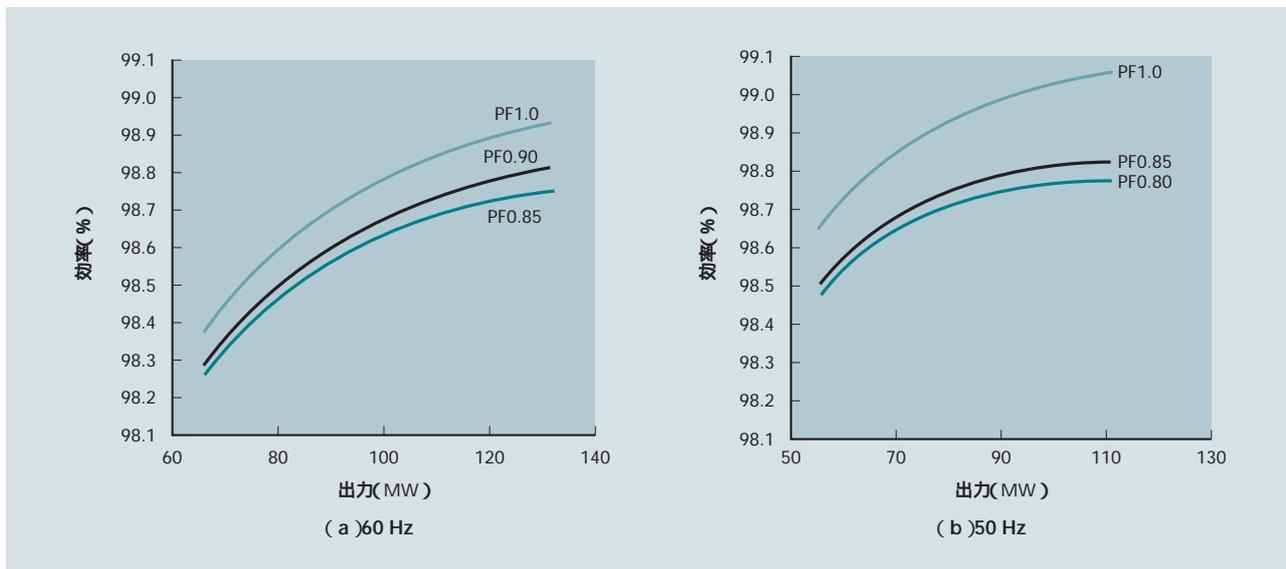


図11 空気冷却発電機GH1550Aの効率測定結果
空気冷却発電機としては、きわめて高い効率を達成した。

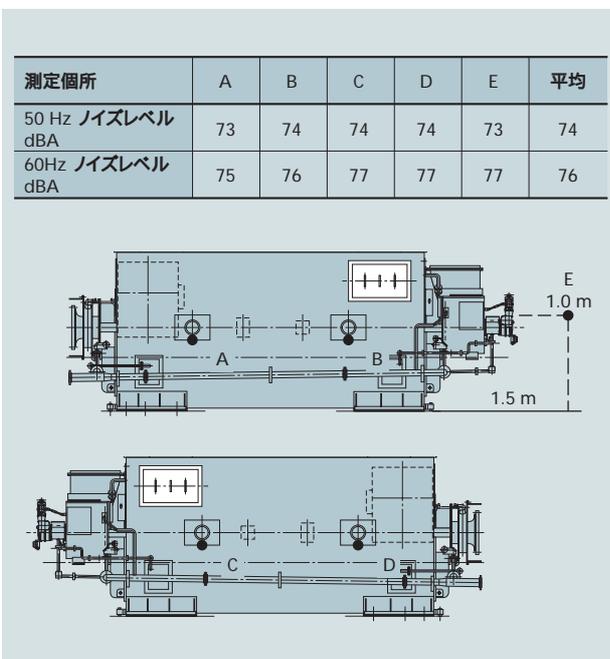


図12 GH1550Aの騒音測定結果
空気冷却発電機としては、騒音をきわめて低くすることができた。

以上の測定結果により、GH1550Aは従来の水素冷却発電機の効率をも凌駕する性能を有する空気冷却発電機であることが確認された。

5.2 発電機の騒音

発電機の騒音測定結果を図12に示す。

50 Hz運転時の騒音値は74 dBA、60 Hz運転時の騒音値

は77 dBAであり、従来の空気冷却発電機に比べ、きわめて低騒音を達成した。特に、60 Hz運転時では18 dBAの騒音低減を達成しており、水素冷却発電機の騒音と同等以上の性能であった。

6. おわりに

ここでは、空気冷却発電機GH1550Aに適用した技術について述べた。

この発電機の効率は空気冷却発電機としては世界最高水準であり、騒音に関しても、従来の水素冷却発電機と同等以上の性能であることが確認できた。

今後は、今回の性能を基に、発電設備の高効率化や低騒音化のニーズに応えていくことにより、社会的貢献を果たしていく所存である。

参考文献

- 1) 柿本, 外: 低騒音型空気冷却タービン発電機の開発, 電気学会回転機研究会資料, RM-07-41(2007.5)
- 2) 服部, 外: 高効率空気冷却発電機GH1550Aの紹介, 日本ガスタービン学会誌, Vol.34, No.4(2006.7)
- 3) 服部, 外: タービン発電機レーベル転位固定子巻線構造の最適化, 電気学会回転機研究会資料, RM-04-141(2004.10)
- 4) 中原, 外: 三次元磁界解析を用いたタービン発電機の無負荷時鉄損の分析, 電気学会論文誌, D124巻8号, 830-836(2004.8)
- 5) 村松, 外: 250 MVA空気冷却式タービン発電機の開発, 日立評論, 87, 2, 185~188(2005.2)
- 6) 服部, 外: インナクーラ冷却方式を適用した高効率タービン発電機の高度設計手法, 日立評論, 84, 2, 177~180(2002.2)

執筆者紹介



柿本 忠昭
2000年日立製作所入社, 電力グループ 日立事業所
電力設計部 所属
現在, タービン発電機的设计, 開発に従事



前 浩之
1981年日立エンジニアリング株式会社(現 株式会社日立エンジニアリング・アンド・サービス)入社, エンジニアリング本部 エンジニアリング第1部 火力プラントグループ 所属
現在, プラント・機械設備の騒音予測, 防音設計, 開発に従事
日本音響学会会員



服部 憲一
1992年日立製作所入社, 電力グループ 日立事業所
電力設計部 所属
現在, タービン発電機的设计, 開発に従事
電気学会会員



高橋 和彦
1989年日立製作所入社, 電力グループ 日立事業所
電力設計部 所属
現在, タービン発電機的设计, 開発に従事
電気学会会員, 日本応用磁気学会会員



府金 圭二
1985年日立製作所入社, 電力グループ 日立事業所
電力設計部 所属
現在, タービン発電機的设计に従事



岩重 健五
1983年日立製作所入社, 電力グループ 電力・電機開発研究所 流体科学プロジェクト 所属
現在, 発電機冷却技術の研究開発に従事
日本機械学会会員, 可視化情報学会会員