

水素間接冷却タービン発電機“VP-Xシリーズ”と要素技術の既設機への展開

舟崎陽一* 古賀清訓*
空 信之* 前田英昭*
近藤雅浩*

Indirectly Hydrogen-cooled Turbine Generator "VP-X Series" and Application of Element Technologies to Existing Generators
Yoichi Funasaki, Nobuyuki Sora, Masahiro Kondo, Kiyonori Koga, Hideaki Maeda

要 旨

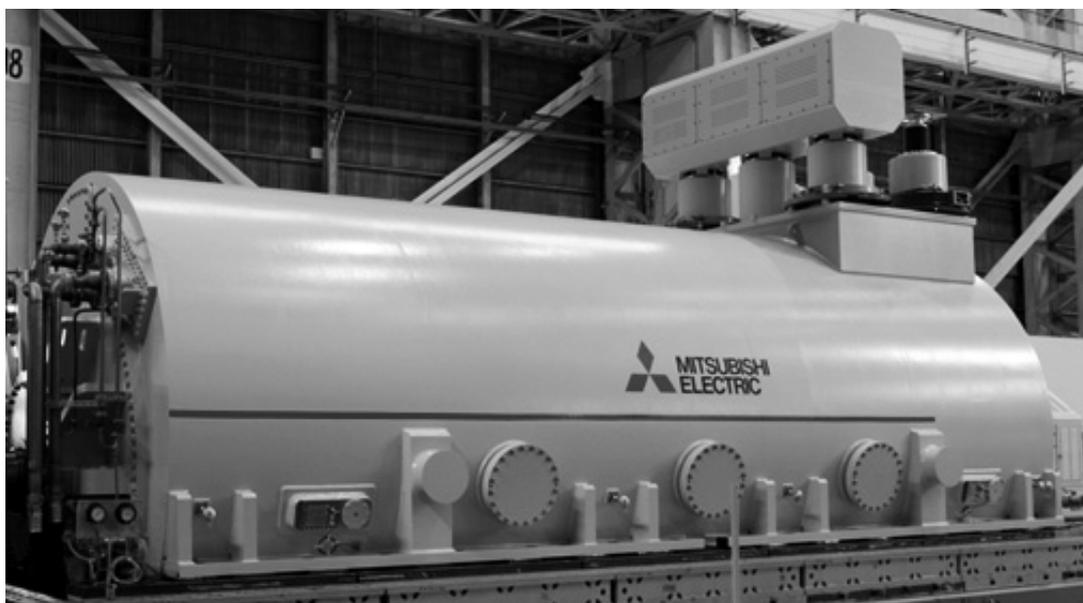
CO₂排出による地球温暖化や世界的な電力需要の高まりを背景に、タービン発電機には大出力化・高効率化及び高い信頼性が求められている。三菱電機では、高効率で構造が比較的簡素な水素間接冷却タービン発電機の大出力化・高効率化の開発を進めてきた。その結果、水素間接冷却機として世界最大出力^(注1)となる900MVA級の出力を可能とする新型発電機“VP-Xシリーズ”の開発に成功した。900MVA級実機検証機での技術検証試験によって、性能及び各部の健全性の確認も完了している。

これまで水冷却方式でしか対応できなかった900MVA

級の大出力域まで水素間接冷却方式を適用可能となり、固定子冷却水供給装置などの付帯設備が不要となることから、水冷却方式に比べて保守面で有利となる。

また、VP-Xシリーズは従来の水素間接冷却機に比べて、大出力化、高効率化、コンパクト化を実現するために、新たに開発した複数の要素技術を適用しているが、これらの要素技術を既設機に部分的に適用することで、大出力化・高効率化が可能となる。新たなアップグレードサービスとして、部分交換・更新を推奨することで、既設機の大出力化・高効率化の要望にも応えていく。

(注1) 2014年12月8日現在、当社調べ



900MVA級水素間接冷却タービン発電機

最新技術を適用した900MVA級水素間接冷却タービン発電機を設計・製作し、工場試験によって設計の妥当性と信頼性を確認した。これらの技術成果を基に、新型発電機VP-Xシリーズを200~900MVAの出力領域でラインアップ化した。

1. ま え が き

CO₂排出による地球温暖化や世界的な電力需要の高まりを背景に、火力発電プラントでは自然資源の更なる高効率利用が急務となっている。また、ガスタービンコンバインドサイクル発電プラントや石炭火力発電プラントでは大出力化の需要が高まっており、タービン発電機としては大出力・高効率で、かつ電力の安定供給を可能とする高い信頼性が求められている。当社では高効率で構造が比較的簡素な水素間接冷却タービン発電機の大出力化の開発を進めてきた。今回水素間接冷却機として世界最大出力となる、900MVA級の出力を可能とする新型発電機VP-Xシリーズを開発し、900MVA級実機検証機での技術検証試験による性能及び各部の健全性を確認した。

本稿では、VP-Xシリーズの開発内容、及びその開発成果を利用した既設機のアップグレードサービスについて述べる。

2. VP-Xシリーズ検証機の仕様

VP-Xシリーズ検証機の主な仕様を表1に示す。

最新技術の適用によって、水素間接冷却機として世界最大出力となる900MVA級の出力と世界最高レベルの効率を達成した。また、大出力ながらも冷却性能強化による出力密度改善及び最適配置構造によって、水素間接冷却方式の従来機に比べて発電機体格を約20%縮小しており、輸送性の向上と設置場所の省スペース化を実現している。

図1に冷却方式で分類した2極タービン発電機のラインアップを示す。

当社では、空気冷却、水素間接冷却、水冷却の3種類のラインアップを持ち、発電出力に合わせて最適な冷却方式を選定している。VP-Xシリーズの完成によって、これまで水冷却方式でしか対応できなかった900MVA級の大容量域まで水素間接冷却方式を適用可能となった。水素間接冷却方式は、固定子冷却水供給装置などの付帯設備が不要となるため、保守面で有利となる。

表1. VP-Xシリーズ検証機の主な仕様

最大出力	870MVA
力率	0.90(遅れ)
回転速度	3,600min ⁻¹
周波数	60Hz
極数	2
効率	99%
冷却方式	水素間接冷却

冷却方式	発電機出力(MVA)												
	100	200	300	400	500	600	700	800	900	1,000	1,500~		
空気冷却	[]			[]									
水素間接冷却	[]										[]		
水冷却	[]												

図1. 2極タービン発電機のラインアップ

3. VP-Xシリーズに適用した最新技術

VP-Xシリーズの開発コンセプトである大出力化、高効率化、コンパクト化は、複数の新開発要素技術の適用によって達成された。それら適用技術の主なものについて述べる。

3.1 大出力化技術

タービン発電機の出力Pは一般に次の式(1)で表される。

$$P=K \cdot D^2 \cdot L \cdot N \dots\dots\dots (1)$$

- K：冷却方式などで決まる係数
- D：固定子内径
- L：固定子鉄心長
- N：回転数

大出力化は冷却改善によってKを大きくするか、体格(D, L)を大きくすることで達成することができる。VP-Xシリーズは、先に述べたとおり冷却性能を強化することで発電機の体格増大を抑えつつ大出力化しているが、発電機出力が制限される温度上昇は図2に示すとおり運転条件によって異なる。そのため各部の温度上昇を抑制する冷却技術の開発が必要であり、ここでは新開発の各冷却技術について述べる。

3.1.1 固定子コイル主絶縁の高性能化

タービン発電機の固定子コイルは高電圧に耐えるように導体部を絶縁層(主絶縁)で保護しており、水素間接冷却方式での固定子コイル冷却は、導体部で発生した熱を主絶縁を介して水素ガスで冷却する方式のため、大出力化を実現するためには主絶縁の熱伝導率向上が課題となる。固定子コイル主絶縁は、ガラスクロス、マイカ層、熱硬化樹脂を主材料として構成される。これら構成材料のうち、熱硬化樹脂が最も熱伝導率が低く、これまで主絶縁の熱伝導率を向上させるため、熱硬化樹脂に高い熱伝導率を持つ充填剤を添加する対策がとられてきた。しかし、従来の製造方法では、含浸工程時に充填剤が流出し、含浸後に充填剤が減少する課題があった。そこで、今回、製造プロセスの最適化を行い、充填剤の流出を大幅に低減させることに成功

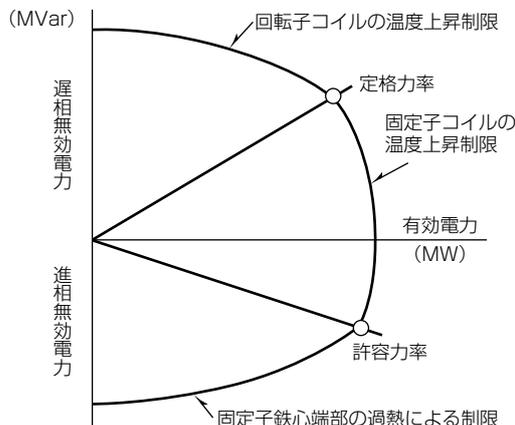


図2. タービン発電機の可能出力特性

した。これによって、多くの実績を持つ絶縁構成材料を変更することなく、主絶縁の高熱伝導化を実現した。

3.1.2 通風路形状の最適化

図3に水素間接冷却タービン発電機の通風構造を示す。

VP-Xシリーズには、従来型発電機で十分実績のある信頼性の高い通風冷却方式を選定した。この冷却方式は、固定子半径方向への単一通風を特徴としている。

各部の通風路形状は、CFD(Computational Fluid Dynamics)解析及び部分モデル風洞試験を用いて、圧力損失が小さくかつ冷却性能に優れる形状に最適化した。例として、図4に回転子ダクト入り口形状の最適化構造を示す。

形状最適化によって、圧力損失は従来形状の約60%低減することをCFD解析及び部分モデル風洞試験で確認した。また、機内温度分布が均一となるよう通風・熱回路網計算を用いて各部通風量を調整した。工場試験で各部の温度・風量を計測し、計測値が設計値とよく一致すること及び設計基準値を満足することを確認した。

3.1.3 固定子鉄心端部の損失・温度解析技術

タービン発電機の固定子鉄心端部は進相運転時に漏れ磁束が増加するため、磁性シールドなどを設置することで過熱対策を施している。

VP-Xシリーズは出力密度を従来機から約20%増加させているため、固定子端部の漏れ磁束を起因とする損失が増加して鉄心端部の過熱が懸念された。そのため、渦電流を考慮した三次元電磁界解析による損失・温度評価を実施した。三相短絡時での温度解析結果と実機検証試験での温

度計算結果がよく一致して高い計算精度を持つこと、及び実負荷進相運転時での温度解析結果が許容値を十分満足することを確認した(図5)⁽¹⁾。

3.2 高効率化技術

発電時に生じる損失は電気損や機械損など多岐にわたる。各損失を低減する新技术を適用して発電効率の向上を図ってきた。ここでは新開発の損失低減技術について述べる。

3.2.1 高効率ファン

機内に加圧封入した水素ガスは、回転子軸の両端に取り付けられたファンによって機内循環され各部の冷却を行うが、風損の発生を伴う。発電機機内の風損は、ファン動力損と機内の通風経路内で発生する圧力損失、摩擦損に大別される。VP-Xシリーズでは、CFD解析を用いたファン翼形状最適化及びファン入り口の吸い込み風路構造の適正化によってファン効率の向上を図り、従来構造と比較して約10ポイント改善した。ファン設計の妥当性は、モデルファンを用いた風洞試験で確認した上で実機へ適用した(図6)。

3.2.2 低損失軸受

回転軸を支持する軸受には振動特性に優れ比較的損失な直潤型テイルテイングパッド軸受(給油ノズルで摺動(しゅうどう)部に直接給油する方式)を従来採用してきた。VP-Xシリーズでは、従来の直潤型テイルテイングパッド軸受からパッド数を最適化することによって、軸受損失を従来品から約30%低減した。実機検証試験から、設計どおり軸受損失が低減すること及び軸振動特性が良好であることを確認した。

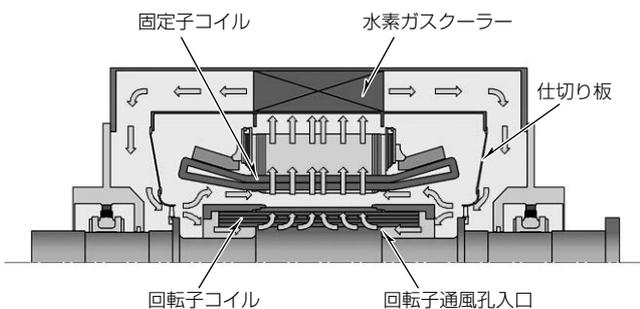


図3. 水素間接冷却タービン発電機の通風構造

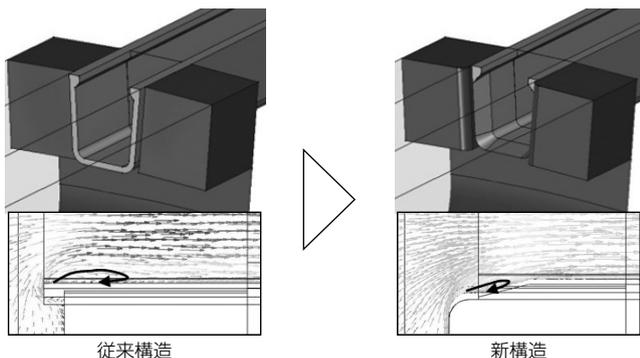


図4. 回転子ダクト入り口形状の変更

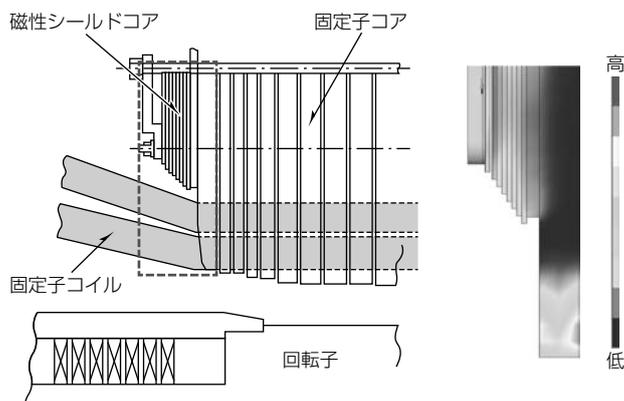


図5. 固定子鉄心端部温度分布(三相短絡時)

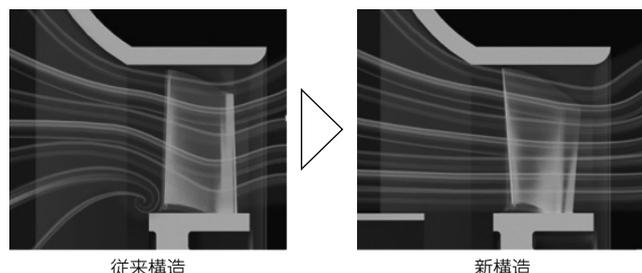


図6. ファンの高効率化

3.2.3 端部漂遊損低減

固定子端部の漏れ磁束は鉄心端部や端部構造物に鎖交して渦電流による損失が生じる。先に述べたとおり、VP-Xシリーズでは従来機に比べて端部漏れ磁束が増加するため、損失を低減する構造、材料を採用している。例として、図7に端部構造物の仕切り板(高圧部と低圧部を仕切る板(図3))に非磁性材料を採用した効果について示す。固定子コイルエンドの近傍に位置することから損失低減効果が大きく、端部漂遊損を約5%低減する効果を得ている。

3.3 コンパクト化技術

鉄道輸送による輸送制限への対応や設置場所の省スペース化の要求など、タービン発電機にはコンパクトな設計が要求される。VP-Xシリーズでは、水素ガス冷却器のフィン性能を向上させることで熱交換性能を従来機から約30%改善し、水素ガス冷却器の小型化を実現した。加えて、水素ガス冷却器を最適に配置することで、固定子フレーム外径を従来機から約20%縮小させた(図8)。固定子フレーム設計は、FEM(Finite Element Method)解析を用いて構造を最適化した。また、工場試験で強度・振動特性に問題ないことも確認した。

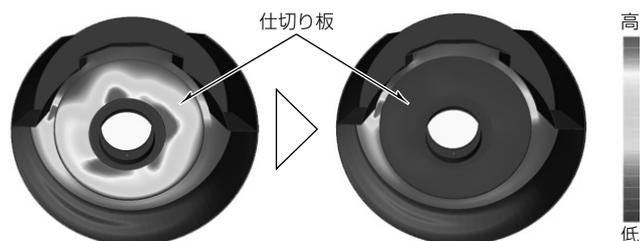


図7. 発電機固定子端部構造物の低損失化

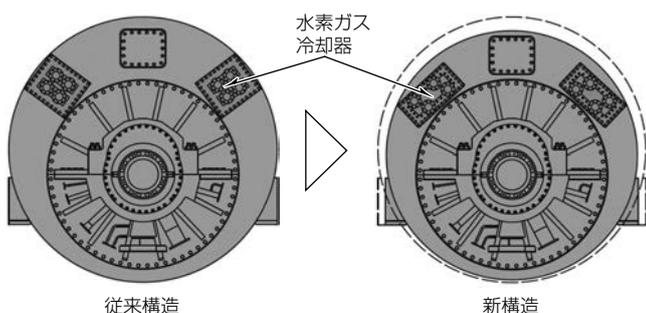


図8. 発電機固定子フレームの小型化

4. 新開発技術のアフターサービスへの展開

当社では、既設機に対してVP-Xシリーズの新開発要素技術を部分的に適用することによって、大出力化・高効率化を実現するアップグレード技術を確立し、新たなアフターサービスメニューとして顧客への提案活動を開始した。次にアップグレードメニューの例を示す。

- (1) 固定子コイルの高性能絶縁適用コイルへの換装による大出力化
- (2) 回転子ダクト入り口形状の変更など冷却強化による大出力化又は高効率化
- (3) 高効率ファンへの換装による高効率化
- (4) 低損失軸受への換装による高効率化
- (5) 固定子端部構造物の損失低減構造・材質への換装による高効率化

どのアップグレードメニューでも、適用に際しては既設機の対象部位とその周辺の構造及び各種特性を詳細に把握した上で、変更となる部位の機能的・構造的な特性変化を正確に予想して設計する技術が重要である。

当社は発電機メーカーとして、新設機の高性能化だけでなく、既設発電機の長期運用化、高性能化にも貢献していく。

5. むすび

新型の水素間接冷却タービン発電機VP-Xシリーズは、200~900MVAの出力領域でラインアップ化し、2015年4月から販売を開始した。

また、VP-Xシリーズの開発で得られた新開発要素技術を既設機に部分適用して長期運用化、大出力化、高効率化を図ることによって、火力発電プラントの近代化に貢献していく。

参考文献

- (1) 空 信之, ほか: 870 MVA水素間接冷却方式タービン発電機固定子鉄心端部損失解析, 平成27年電気学会全国大会論文集, 5-043 (2015)