

大容量全含浸 2 極空気冷却タービン発電機

木村 誠(きむら まこと)

日和佐 寛道(ひわさ ひろみち)

阿久津 信雄(あくつ のぶお)

1 まえがき

近年、コンバインドサイクルあるいはガスタービン発電機として、大容量全含浸 2 極空気冷却タービン発電機（空冷機）の需要が増大している。この背景には、空冷機が水素冷却タービン発電機に比べ、短期間での据付けが可能であること、初期投資額が低いこと、メンテナンスが容易であることなどの利点に加え、解析技術の進歩による信頼性の向上や効率の向上などが挙げられる。

富士電機では、このような市場ニーズにこたえるべく大容量全含浸空冷機の開発に取り組み、50 Hz 機では出力 300 MVA、60 Hz 機では出力 250 MVA の系列化を完了した。

この発電機は、富士電機が1999年に試作した 126 MVA 試作実験機での検証を基に、空冷機の大容量化に対する製品信頼性と経済性を兼ね備えた発電機である。

図 1 に大容量全含浸空冷機の断面構造を示す。

2 2 極タービン発電機の出力範囲と仕様

富士電機の 2 極タービン発電機の出力と冷却方式を図 2

に示す。

主な仕様は次のとおりである。

- (1) 出力 : 50 Hz 300 MVA 以下
60 Hz 250 MVA 以下

図 2 2 極タービン発電機の出力と冷却方式

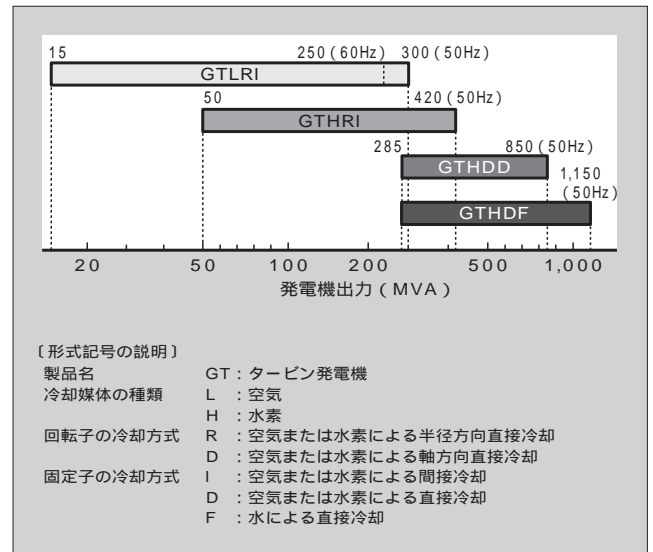
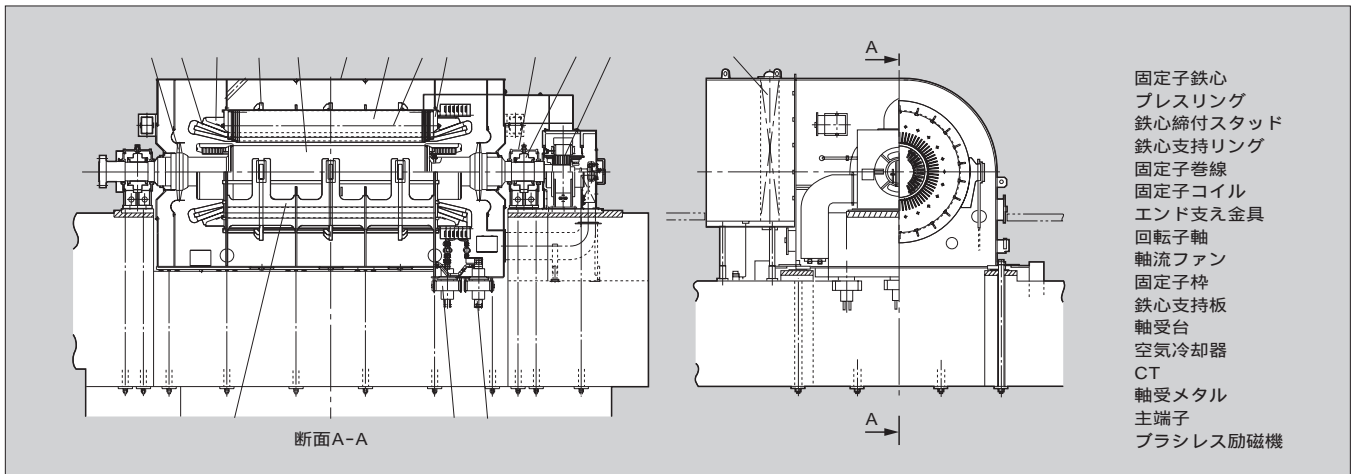


図 1 大容量全含浸空冷機の断面構造



木村 誠

大型回転機の電気設計および開発に従事。現在、エネルギー製作所回転機設計部。電気学会会員。



日和佐 寛道

大型回転機の電気設計および開発に従事。現在、エネルギー製作所回転機設計部課長補佐。電気学会会員。



阿久津 信雄

大型回転機の構造設計および開発に従事。現在、エネルギー製作所回転機設計部副参与。

- (2) 電 圧 : 11 kV , 13.8 kV (190 MVA 以下)
16 kV (200 MVA 以上)
- (3) 力 率 : 0.85 (遅れ)
- (4) 絶縁階級 : F 種
- (5) 冷却方式 : 固定子.....間接冷却
回轉子.....半径方向直接冷却
- (6) 励磁方式 : ブラシレス励磁方式
サイリスタ励磁方式

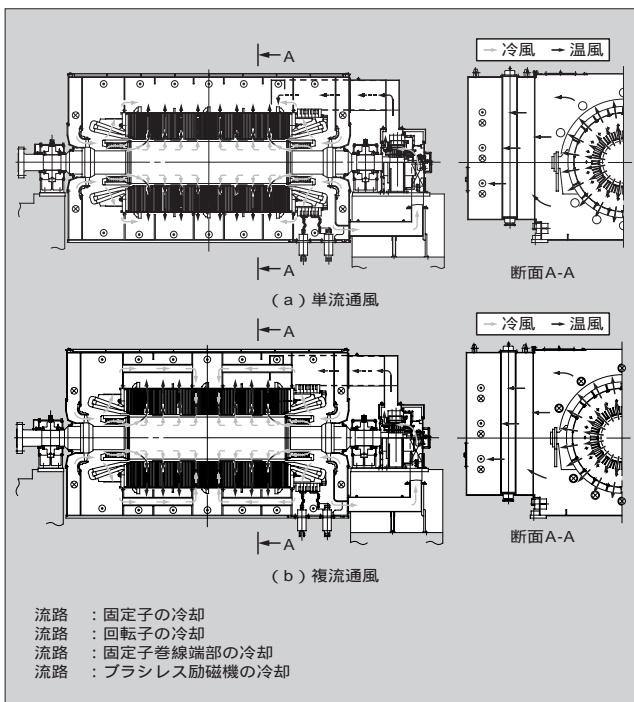
③ 通風冷却

空冷機において通風冷却技術は大容量化を実現するための重要な要素の一つである。通風の最適化によって、発電機内の温度上昇を平準化させ利用率を高めることができ、さらに各部の風量・圧力損失を抑えることにより風損が減少し高効率化が可能となるからである。富士電機ではこれまでに、実験、解析を繰り返し、通風冷却技術の改良とともにその設計精度向上に努めてきた。近年では、流れ解析による機内通風シミュレーションが導入され、通風の最適化をより一層飛躍させている。

3.1 固定子の通風冷却

図3に固定子間接冷却発電機の通風方式を示す。
図3(a)は冷却風を軸端の軸流ファンにより固定子の両端部から送り込む方式で、単流通風と呼んでいる。この方式は主に、比較的鉄心長の短い小・中容量の発電機に採用され、固定子枠の構造が簡素化されるなどの長所を持つ。
固定子鉄心の冷却ダクト配置を最適にすることによって巻線温度の均一化を実現している。
固定子両端から送り込まれる冷却風は固定子鉄心内径部

図3 固定子間接冷却発電機の通風方式



および回轉子の熱を吸収しながら空気を流れるため、鉄心長の長い発電機では中央部の冷却風温度が上昇し、その分固定子巻線の温度も高くなる。この場合、冷却風量を増加させる対策も考えられるが、これは風量増による風損の増加およびファン部での冷却風の温度上昇をきたすことから効果が小さい。

これらの理由から、鉄心長の長い空冷機では、図3bに示す複流通風が適している。この方式は冷却風を固定子の両端部と中央部から送り込む方式で、鉄心中央部を温度の低い冷却風で冷却するので、風量を必要以上に増加させることなく巻線の温度を低減し、均一化することが可能である。

実際の設計において、個々の発電機にいずれの通風方式を適用するかは、通風回路網計算と巻線温度計算により詳細検討を行い最適となる通風方式を採用している。同様に、通風ダクト配置についても最適化を図っている。

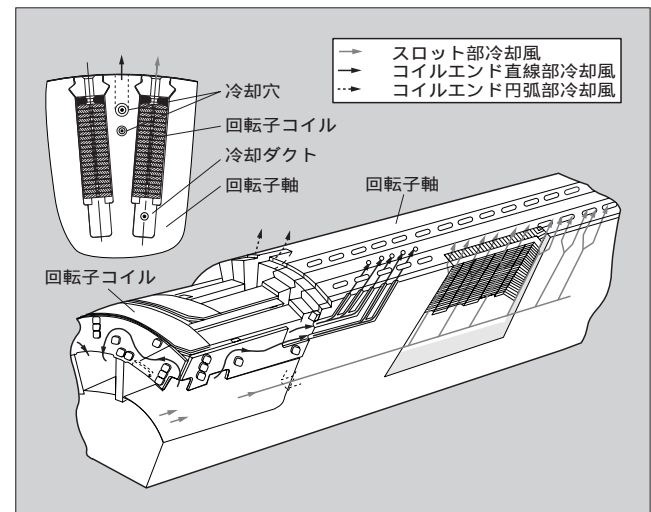
3.2 回轉子の通風冷却

回轉子の通風冷却技術は、126 MVA 試作実験機での検証を基に開発された新技術を採用している。図4に回轉子巻線の通風構造を示す。

- この通風構造は次の特長を持っている。
- (1) 回轉子スロット部の巻線導体冷却穴を従来の直角から図に示すような斜めにしたことにより、軸方向の風量分布が均一化され端部側の風量が増大し、軸端部および近接する保持リング部の導体温度を低減できる。
 - (2) 保持リングによって保持される回轉子巻線端部の冷却は、流路をコイルごとに通風する方式を採用しており、端部巻線が一様に冷却されるよう工夫されている。
- さらに巻線端部の温度上昇を低減させる対策として、周方向の巻線導体幅を軸方向の導体幅よりも大きくし、抵抗損を減らしている。

これらの通風技術の優位性は、流れ解析や126 MVA 試作実験機での検証から確認されている。

図4 回轉子巻線の通風構造

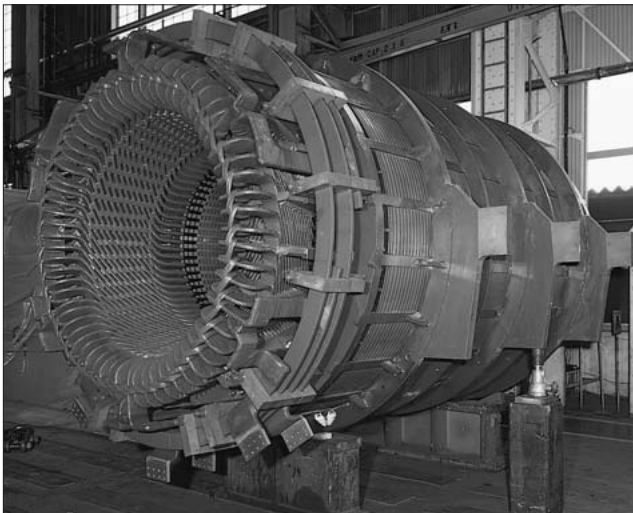


4 絶縁

4.1 全含浸固定子絶縁

固定子巻線の絶縁には全含浸絶縁方式を採用している。主絶縁にはガラス基材の集成マイカテープを用い、内部および外部コロナ防止を施した後、固定子鉄心スロットに挿入してエポキシ樹脂を真空含浸する。図5は、含浸後の完成した固定子の外観を示す。

図5 含浸後の完成した固定子の外観



N89-6681-2

図6 全含浸固定子絶縁システム

固定子巻線絶縁システムの特長
全含浸絶縁方式による ○メンテナンスフリー
○冷却効果の向上

項目	技術項目	全含浸絶縁方式	通常絶縁方式
メンテナンスフリー	コイルの振動防止	特殊充てん材の保持力による振動防止	スプリングライナの挿入による振動防止
	コイルエンドの経年的なゆるみ防止	樹脂によるコイルエンドの一体化	定期的なコイルエンド点検とゆるみ補修
	固定子くさびの経年的なゆるみ防止	樹脂によるくさびの接着	定期的なくさびの点検とゆるみ補修
	固定子鉄心の経年的なゆるみ防止	樹脂による鉄心の接着	定期的な点検とゆるみ補修
冷却向上	鉄心の防錆	樹脂による鉄心のコーティング	定期的な点検と補修
	巻線温度低減	スロットとコイルの間の空けきは樹脂で充てんされ、熱抵抗が減少する。	スロットとコイルの間の空けきがコイル冷却の熱抵抗となる。

全含浸絶縁方式

スロットすきまへの樹脂の充てん

通常絶縁方式

スロットすきま

全含浸システムは、富士電機の小容量機で利用していた技術を改良拡大したのであるが、欧州のメーカーでは空冷機にとどまらず、水素冷却タービン発電機にも適用されており、今後の主流と見られる絶縁方式である。

個々に鉄心スロットにコイルを挿入する通常の絶縁方式に比べ、図6に示すように種々の利点を持っている。

4.2 回転子絶縁

回転子巻線の絶縁にはF種絶縁を採用しており、耐熱性が高く、高強度のガラスエポキシ積層板を中心素材として使用している。

また導体と絶縁物の熱膨張差により、すべりが生じ、この部分に摩擦粉が発生するのを防止する対策も実施されている。

5 全含浸固定子の構造

固定子枠は上下二分割構造を採用している。下部枠には固定子鉄心と固定子巻線からなる固定子が支持されている。固定子は電磁力により、だ円形に変形し、その変形が回転サイクルで回転するので、これを支持する固定子枠には回転の倍サイクルの振動が発生する。富士電機ではこの振動問題を回避すべく、すべての空冷機の固定子をばね支持する構造を採用している。固定子をばね支持することにより、固定子枠の振動は固定子鉄心の振動の約 1/7 に低減することが実証試験で確認されている。

また、固定子枠は、突発短絡時の強度確保と回転周波数および2倍周波数の励振力との共振を回避する必要がある。このため、設計時に有限要素法による強度および固有振動解析を行っている。解析の対象となる主要部品は、上下固定子枠、固定子鉄心、固定子巻線であり、解析モデルの作成で特に重要なことは、固定子巻線の剛性を考慮した固定子鉄心の等価剛性と、固定子枠の基礎設置部の境界条件である。富士電機はこれまでに多数の発電機に対し、固定子鉄心の荷重試験、全含浸後の固定子の加振テスト、さらには発電機全体の加振テストを実施し、これらに関する豊富

図7 2相突発短絡時の固定子枠の応力解析結果

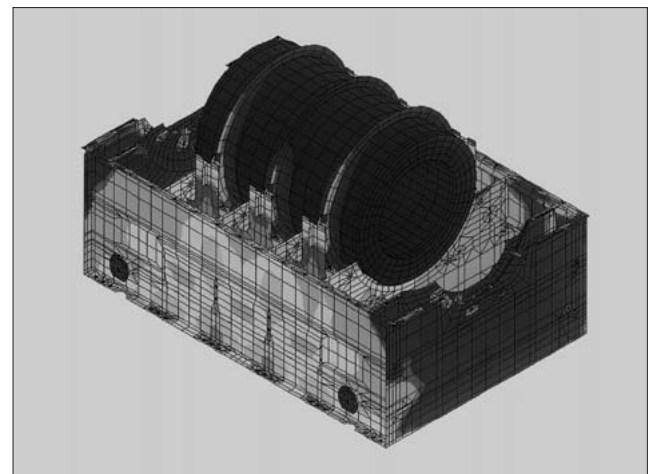
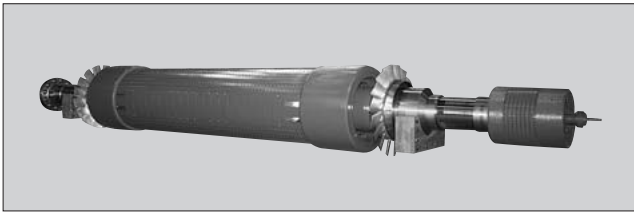


図 8 回転子の外観



N89-6681-44

な基礎データを有している。

これらの強度および固有振動解析により、固定子枠は高剛性構造で、振動上も問題となる固有振動数は存在しないことが確認されている。図 7 に 2 相突発短絡時の固定子枠の応力解析結果を示す。

⑥ 回転子の構造

回転子には、強大な遠心力が作用するので、各部品は高強度で、信頼性の高いものでなければならない。このため、回転子軸には高強度、高靱性の NiCrMoV 鋼が使用され、界磁巻線端部を保持する保持リングには、非磁性で応力腐食割れ感度が低く、高靱性、高強度の 18Mn18Cr 鋼が使用されている。また、界磁巻線にはクリープ特性に優れた銀入り銅が使用され、界磁巻線をスロット内に保持する回転子くさびには高強度と高導電率を兼ね備えた特殊合金が使用されている。

また、大容量空冷機の回転子は、細長い形状をしているため振動対策が非常に重要である。富士電機が実施している主要な振動対策は次のとおりである。

- (1) 回転子軸中央部の剛性の非対称性を極力低減する。
 - (2) サーマルアンバランスを小さくするために、界磁巻線および回転子くさびの熱膨張を拘束し過ぎぬよう、摩擦係数を低減する。
 - (3) 軸の軸受ジャーナル部の真円度を高める。
 - (4) オーバハンク形ブラシレス励磁機を小型・軽量化する。
- 図 8 に回転子の外観を示す。

⑦ ブラシレス励磁機および磁石同期発電機

富士電機は、励磁方式として標準的にブラシレス励磁方式を採用している。この励磁装置の構造上の特長は、回転整流装置を交流励磁機に内蔵することで小型・軽量化を実現し、発電機全体の振動を抑制している点である。さらに、励磁機を軸端にオーバハンク取付けとすることによりメンテナンス性の向上が図られている。

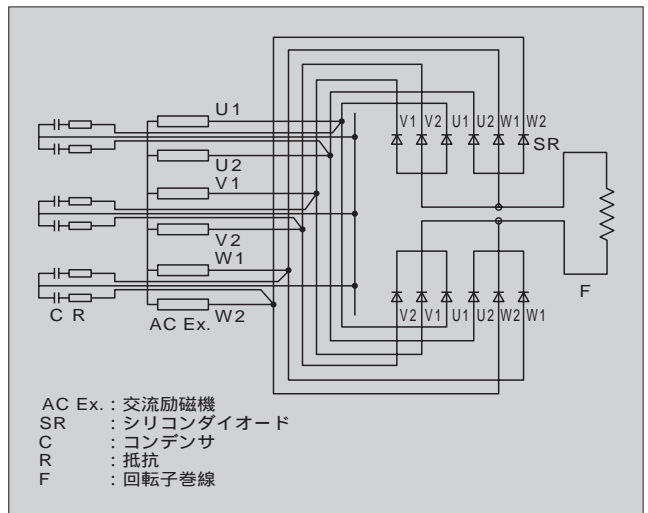
また富士電機はブラシレス励磁機の励磁電源として、系統事故による電圧降下があっても励磁機に励磁電源を安定的に供給できる磁石同期発電機 (PMG) を標準的に採用している。この PMG に対してもエネルギー積が非常に大きい希土類磁石を使用することにより、小型・軽量化を図っている。図 9 にブラシレス励磁機の外観、図 10 にブラシレ

図 9 ブラシレス励磁機の外観



N89-6681-25

図 10 ブラシレス励磁機の結線図



ス励磁機の結線図を示す。

⑧ あとがき

大容量全含浸 2 極空気冷却タービン発電機についての構造と特長について述べた。これらの技術を適用した発電機は、126 MVA 試作実験機や高度な解析手法によって詳細検証が実施されたものであり、十分な信頼性を有している。今後も市場の要求にこたえるべく空冷機の大容量化と性能向上に努める所存である。

参考文献

- (1) 日和佐寛道ほか：2 極空気冷却タービン発電機の損失，電気学会研究会資料回転機研究会，RM-00-9 (2000)
- (2) 木村誠ほか：2 極空気冷却タービン発電機の漂遊負荷損の検討，電気学会全国大会，5-009 (2000)
- (3) 三村一郎・佐藤昭二：新系列 2 極空気冷却タービン発電機の完成，富士時報，Vol.72，No.5，p.263-266 (1999)



*本誌に記載されている会社名および製品名は、それぞれの会社が所有する
商標または登録商標である場合があります。