U.D.C. 621. 313. 322-815-192

大容量タービン発電機の信頼性 Reliability of Large Turbine Generators

As the turbine generator grows in unit capacity its reliability is becoming an issue of major proportions. To ensure high reliability for a newly designed, large capacity machine, it is important to determine design problems in reliability, confirmation of the performance of every component by way of a full-sized model test, and endorsement of test results by calculation. Trial manufacture schemes for principal components and reliability tests for turbine generators are introduced in this article.

川村	隆*	Takashi	Kawamura
吉良貞	〔省*	Sadami	Kira

□ 緒 言

タービン発電機の大容量化が進められるにつれ,個々の発 電機の電力系統に及ぼす影響も大きくなり,その信頼性の向 上が従来にも増して要求されるようになってきた。発電機は 機械的,熱的および電気的な問題から制限される限度内にて 出力を増大させるため,回転子および固定子の各コンポーネ ントは,従来にも増してその使用限界に近い運転を余儀なく させられるため,その安全性の確認を行ないつつ一歩一歩出 力を増大することが必要である⁽¹⁾。 加熱温度を低めとし、焼入れ時の冷却速度を速くしているこ となどにより靱(じん)性の向上、遷移温度(FATT)の低下を 図っている。さらに 800MW級以上の二極機においては従来 のNiMoV鋼に代わってNiCrMoV鋼とし、引張強度と靱性の 両方の向上を行なうことが必要となる。

新構造・新設計品に対する最も確実な信頼性確認は,実物 大断面の回転破壊試験であり,図2のような実機と同一断面 のロータ(実物ウエッジおよび等価コイル付)を回転破壊装 置中で空気タービンにより回転して破壊回転数および破壊の 形態を確認することである。図2では1,000MW級火力機につ き実測し,計算値どおり6,400rpmにて破壊,安全率が3以 上あるのが確認できた。今後も破壊靱性を考慮し,また有限 要素法を利用した計算法により安全性を確認しつつ,必要に 応じて回転破壊試験をも行なう予定である。

日立製作所においては、火力用670MVA機および原子力用 626MVA機を工場完成し⁽²⁾, さらに原子力用940MVA機を製 作中であるが、近い将来、1,000~1,200MW級火力機および 1,100~1,500MW級原子力機の製作のため、その基本設計を 完了して問題点を摘出し、ロータシャフト、ウェッジ、軸受、 コイルなどの主要部品については先行試作および特性確認試 験によりその信頼性を確認し、合わせて計算値との突合せに より精度の高い特性予測に努めている。上記、主要部品の信 頼性確認試験の方法およびその結果、さらにそれらを組み合 わせた特性としての軸振動、温度上昇、電磁力などに対する 配慮につき以下に述べる。

2 発電機回転子の信頼性

発電機回転子の重要部品にはシャフト,ウェッジ,界磁巻線などがあり,以下そのおのおのの信頼性について述べる。 2.1 ロータシャフト

ロータシャフトは図1に示したように容量とともにその重 量および寸法が増大する。1,000MW級を越える原子力用四極 機用軸材も現時点で国産品で入手可能であり、必ずしも組立 式とする必要はないが、将来さらに大容量化したときには単 一鋼塊でない組立式ロータとなる場合も十分に考えられる。 その場合には各部材は、より均質な介在物の少ないものを入 手できる利点はあるが、一方、組立方法によっては単一鋼塊 と同一の信頼性が得にくい場合もあり、十分な検討を要する。 製鋼メーカーにおいては材料強度試験や外周超音波探傷試験 などの品質検査が行なわれるが、新材料の場合や新しいロー

2.2 ロータウエッジ

ロータウエッジは界磁コイルをスロット内に保持する重要 部品であり、直接水素ガス冷却機においては水素ガスの導入 または排出孔の形状の加工精度の点から加工性の良い材料と する必要があり、強度も高い超ジュラルミンが用いられてい る。本ウエッジの信頼性確認もたとえばクリープ特性に関し ては図3のように実物ウエッジにて荷重条件などを種々にと って実物確認をし、クリープ強度また疲労強度を直接水素ガ



タ断面などの新設計の場合などは、中心孔よりの超音波探傷 試験や中心孔よりの磁粉探傷試験などをも追加して品質確認 軸材重量の変遷 义 | 発電機軸材の容量と重量の関係を示す。 を行なうのが特徴である。また近年、鋳込時の真空度の上昇 Fig. I Tendency of Generator Rotor Forging Weight により脱ガス効果を高めること,熱処理において焼入れ前の

* 日立製作所日立工場

大容量タービン発電機の信頼性 日立評論 VOL. 55 No. 7 668



実物大ロータ回転破壊試験 义 2 空気タービンに駆動される回転破壊試験装置において、実機と同一 断面にて破壊回転数および破壊形態を実測し,新断面機の信頼性確認をする。

Fig. 2 Full Size Rotor Bursting Test



アルミ合金ウエッジの疲労およびクリープ強度 図 3 直接水素ガス冷却形アルミ合金ウエッジの 疲労およびクリープに対する安全率は,長期間使用を考慮しても荷重で3倍以上ある。

Fig. 3 Fatigue and Creep Strength of Aluminum Alloy Wedges

ス冷却機のウエッジに関して得ている。約20年の運転,約 1,000回もの起動停止に関してもき裂の発生に対して荷重にて 3以上の安全率があることが同図からも確認されるが、個々 の発電機にて確認するという趣旨で運転開始後約4年めには ロータ外表面からの斜角超音波探傷や硬度調査などによるウ エッジ確認、また約8年めにはウエッジ全数抜出しによる目

2

減の目的で, 非磁性材で高い焼ばめ応力やコイルエンドおよ び自身の遠心力による応力に耐えうる高材力品である必要が あり、現時点では18Mn5Crの特殊鋼(オーステナイト系)が 用いられている。 本リングは、ロータ部品中最大応力(内周の周方向応力) を示すものではあるが、切欠きがほとんどない単純な形状と して応力集中を避けており、十分に高い計算精度にて応力値 および安全率を求めて安全確認をすることができる。 本リングは斜角および直角の超音波探傷, さらに浸透探傷

により有害な欠陥もしくは介在物などがないことを確認のう えで購入されており、機械加工後に 120% 過速度時に見合う 応力および変形を油圧により等価的にくり返し加えて永久変 形が出ないことをもって特性確認されている。

2.4 界磁巻線

界磁巻線の信頼性において重要なのは、ホットスポットを 視および実体顕微鏡確認を標準点検項目として推奨している。 も含めて界磁巻線の運転時の温度が絶縁物の許容値以下にあ 起動停止回数が1,300回を越えれば、上記8年めと同じ精密 ることである。そのためには、直接水素ガス冷却の回転子コ 点検を推奨している。 イルに所要風量が通ることが前提であり,新構造採用の場合, 2.3 界磁コイル保持リング たとえばギャップピックアップ方式,または近年の原子力機 界磁コイル保持リングは固定子鉄心端部の漏えい磁束量低 用ラジアルフロー方式などの採用にあたっては図4のような 実物大ロータにより通風特性試験を事前に行なって,計算値 どおりの風量が通ることを測定して特性確認試験としてきた。 さらに最近は、 ロータをステータに組み込んだ最終の段階で の通風確認として、図5のように空隙(げき)のガス温度分布 を、あらかじめ固定子コイルスロット入口部に多数設けたサ ーモカップルにて測定することにより行なうという例も大容 量新設計品の工場試験の際に行なわれるようになってきた。 日立製作所では回転子各部の温度分布の測定,またホット スポットの確認の意味で回転子コイルのほか各部にサーモカ

大容量タービン発電機の信頼性 日立評論 VOL.55 No.7 669



図 4 回転子通風特性試験 回転子コイルの直接水素ガス冷却方式の新 構造採用に際しては、モデルによる確認に加えて本図のように実物ロータを用 いての通風特性の確認を行なう。

Fig. 4 Ventilation Characteristics Measurement of Rotor



図 6 回転子温度分布測定 測定用スリップリングを直結し、ロータの温度分布を直接測定する方式を示す。

Fig. 6 Temperature Distribution Measurement of Rotor





図 5 空隙ガス温度上昇分布 スロット上部に設置した試験用サーモ カップルにより空隙温度を測定し,通風特性確認とする。

Fig. 5 Temperature Distribution of Air Gap Gas

ップルを取り付け,軸中心孔からリード線を引き出して測定 用スリップリングにより計測する方式を実用化し(図6),モ デル機,実機などにて直接的に温度上昇を確認している。

また温度上昇の問題に次いで界磁巻線にとって重要なのは 界磁接地あるいは界磁巻線層間短絡の問題であり,界磁巻線 図7 マガジン形ブラシホルダ 超大容量機,原子力機などは,運転 中のブラシ交換を容易にし、ブラシまわりの信頼性向上の意味で本ホルダを用 いる。

Fig. 7 Magazine Type Brush Holder

リップリングおよびブラシが必要である。大容量機において は絶縁筒焼ばめ方式の採用により、従来のボス付スリップリ ングのようにシャフトを細くする必要がないこと、また図7 のようにマガジン形ブラシホルダの採用により、運転中にも 安全にブラシ交換ができるようにしていることの2点により、 信頼性の向上を図っている。

2.6 ロータおよびボデーの構造とうず電流

発電機の非同期運転時または不平衡負荷運転時などロータ 表面にうず電流が流れる場合にも各部材の温度上昇を限度内 に押える必要があり、現時点での逆相耐力は短時間耐力とし て、 $I_2^2 t \leq 10$ (I_2 は単位法で表わした逆相電流値、tは秒で表

組込作業時から始まって現地におけるロータそう入時に至る	わした継続時間),連続耐力として, $I_2 \leq 0.09$ (pu)となって
までの金属異物侵入防止につき、細心の配慮が必要であり、	いる。この限界は短時間耐力に対しては、超ジュラルミンの
工場内および現地における防塵(じん)服, ロータ保管の防塵	ウエッジ温度を 200°C 程度以下,界磁コイル保持リングの焼
カバーなどが信頼性確保の点で不可欠である。	ばめ部の局部温度を 375℃程度以下,また軸材の局部的な最
2.5 スリップリング	高温度を 400℃ 程度以下に押え, またその頻(ひん)度も2回/
日立製作所の大容量機の標準励磁方式はコミュテータレス	年以内に押えて損傷を防ぐというところから定めたものであ
方式(直結交流励磁機と静止整流装置の組合せ)であり、ス	る。一方、連続耐力は長時間のクリープ特性をも考えて、超

ジュラルミンウエッジもダンパの温度もともに約 100℃ 程度 以下になるように定めたものである。

また超大容量機においては、この逆相耐力が設計上の大き な制約条件となってくるため、これを低減してマシンサイズ を低減しようという動きもアメリカその他⁽³⁾にあり、これは 800MVA機までは $I_2^2 t = 10$ とし、漸次低減して1,600MVA機 では $I_2^2 t = 5$ にしようとするものである。これは通常考えら れる不平衡短絡事故などにおいても $I_2^2 t = 5$ を越えるような ものがきわめて発生しにくいことにもよっている。

ロータボデー端部の構造上の問題点は、軸方向に流れてき たうず電流がボデー端部で界磁コイル保持リングとダンパに 分流する所であり、また従来ウエッジ切れめでの電流のまわ り込みが問題であったことも考慮し、火力用二極機では、800 MVA級、原子力用四極機では、1,000MVA級以上においては 従来の部分ダンパを全長ダンパとして、逆相電流による局部 的温度上昇の低減を図る子定である。これらの逆相耐力につ いては、ロータ各部の温度分布を図6の測定用スリップリン グにて計測する一方、図8のような実物大モデルロータにお いてロータ表面のうず電流分布、磁束分布および温度分布な どの測定を行なって、さらに大容量機の定期検査時のウェッ ジあるいはボデー端部の点検結果をも加味して判断している。 2.7 ロータ振動

ロータ振動が過大になると軸および軸受まわりに損傷が生 じてくる。軸受部における軸振動両振幅にて $300 \sim 400 \mu$ だと ラビリンスパッキン,油切り,エアデフレクタの接触などに 加えてバビットの疲労損傷やシールリング追従の問題などが 生じ,1mm程度であると軸の疲労損傷やバビット損傷,さら に振幅が増すと軸受まわりボルトの破壊から大破壊へと波及 する可能性がある。したがって二極機の例では 125μ を警報 点, 200μ をトリップ点とし、また四極機の例では 175μ を警 報点, 250μ をトリップ点とする場合が増してきている。



また発電機に固有なロータ振動としては、シールリングの 摺(しゅう)動によるもの、ロータウエッジのはめ合いかたさ の不均一によるもの、ロータ通風の不均一によるもの、さら に界磁巻線の層間短絡によるものなどが考えられ、単品の品 質管理とともに工場でのバランス調整あるいは組立試験の際 に軸振動ベクトルの動きなどによる十分にして詳細な軸振動 特性の確認が望まれる。工場におけるタービンと発電機の直



図 9 乱流軸受特性確認 大径(25"¢:635mm) 高速軸受の油流が乱流 となることによる発生損失(a),油量,メタル温度分布(b)および圧力分布を測 定して信頼性確認を行なった。

Fig. 9 Measurement of Characteristics of Turbulent Flow Bearings

結は望み得ないものであるが、大容量新設計品においては、 スリップリングの防振軸受からスタブシャフト、さらには交 流励磁機まで工場にて直結し多軸受系としての振動特性を確 認することもある。

3 発電機固定子の信頼性

発電機固定子の重要部品には軸受,フレーム,固定子鉄心などがあり,以下そのおのおのの信頼性について述べる。

3.1 軸受およびシールリング

軸受およびシールリングは、ロータ振動に大きな影響を与 える。特に後者は超大容量機で水素圧が 4.2kg/cm²gないし 5.3kg/cm²gになってきたときにもシール性能を保ち、水素ガ スの漏えいを防ぐという重大な機能を有している。前者につ いては、内径25 * ¢ (635mm)の軸受を 1,300 MW級二極機用の 事前試作として製作し、図9のようにその特性確認を行なっ た。油流は完全な乱流となり、層流に比較すると油膜厚さ、 発生損失、温度上昇とも増大する傾向にあるが、計算された 特性との一致も良く、また実測されたバビット温度も軟化温 度に対して十分な裕度を有し、また軸の安定性(耐ホイップ 性)の点からも本軸受が十分に実用できることが確認された。 図10は内径25 * ¢ (635mm)、機内圧力6kg/cm²gのシールリン

図8 ロータ表面うず電流特性確認(静止時) 実物大断面のモデル ロータにより,表面うず電流分布,温度分布および磁束分布を確認し,逆相耐 力を判定するものである。

Fig. 8 Measurement of Eddycurrent Characteristics of Rotor Surface

4

グの性能試験装置およびその結果であり、従来と同一構造の
4分割の特殊青銅製のシールリングにより機内ガスの漏えいがなく、またシールリング油量、温度上昇とも妥当な値であることが確認された。
3.2 固定子フレームの振動および変形応力
固定子フレームは、その固有振動数を鉄心の倍周波振動から十分に離しておく必要があり、同時に万一、機内水素ガス

大容量タービン発電機の信頼性 日立評論 VOL. 55 No. 7 671



図10 シールリング特性確認 大径(25"¢:635mm)高水素圧シールリング の実物モデルにより,シール特性,温度分 布特性,油量および振動などの基本性能を 確認した。

Fig. 10 Measurement of Characteristics of Seal Rings

(a) シールリング試験装置

(b)シールリング試験結果の一例; シールリングの温度分布



図|| ステータフレーム振動および 強度確認試験

(a) 上置クーラトップドーム形

(b) 立て形クーラ(一重フレーム形)

新設計・新構造ステータフレームの場合に は、¼縮尺鉄モデルにより振動特性,強度, および変形などを確認する。

Fig. II Vibration and Deformation of Stator Frame

爆発時に際しても耐爆容器として動作するよう設計製作され ている。実機における確認試験として励振マグネットを用い ての固有振動数測定や、水圧試験などを新設計品については 必ず行なっているが、さらに新構造の採用に対しては図11の ように事前に¼縮尺の鉄モデルを製作し、振動特性および変 形、応力を細部にわたって測定し計算値とつき合わせながら、 性能確認を行なっている。

3.3 固定子鉄心

固定子鉄心ではその4節振動の振幅が約100µ程度以内と なるように剛性および磁束密度が設定される。また固定子鉄 心端部に対しては,主として軸方向の漏えい磁束によるうず 電流損の低減のため,鉄心歯部にスリットを切ってあるが, これによる剛性低下を防ぐためエポキシ樹脂系接着剤により エンド部数パケットを接着固化し,さらに面圧低下防止の意 味でエンドダクトフィンガにはテーパを付け,鉄心間に数個 所のテーパシムをもそう入している。

3.4 直接液体冷却固定子コイル

固定子コイルの信頼性確保は,水冷部品のロウ付作業の問題,コイル近傍の構造物の過熱防止,無通水部を含めたコイルの温度上昇の問題に加えて,電磁力による振動を許容値内



に押えて絶縁物の損傷を防止することにかかっている。スロ ット内については図12のような、またエンドコイルに関して は図13のような振動防止策を採っているが、電磁力は図13の ように容量とともに増大し続けるため、1,000MVA級の超大 容量機においては並列回路数を増大して(たとえば4並列巻 線など)これに対処することが必要となる。同一容量機であ れば、端子電圧を低減して並列回路数を2から4に変更すれ

図12 スロット内固定子コイル断面 スロット内における固定子コイ ルはテーパウエッジ半導体・スプリングやコンプレシブルストリップによる完 全な防振構造となっている。

5

Fig. 12 Stator Coil in Slot

大容量タービン発電機の信頼性 日立評論 VOL.55 No.7 672

注:水素爆発試験 H2 30% 00 $/ \, \mathrm{Gm}^2$ 空気 70% (kg 爆発圧力 点火 100 時間 (ms) (a) 爆発圧力一時間特性 6 60 (kg / cm² (80 最高圧力到達時間 d 爆発圧力 40 2 卜内電磁力 M 火力用二極機 および原子力用 四極機 20 40 60 80 100 0 5 水素純度(%) П K (b) 爆発圧力一時間特性 水素爆発試験結果 図14 水素爆発は実機では大気圧の状態からしか生 じ得ないので、本図のように短時間のみ7kg/cm²に達することになる。



図13 固定子コイル構造と電磁力 スロット内およびコイルエンドの 電磁力は容量とともに増大するので、並列巻線数の増加などにより電磁力を低 減して信頼性を確保することが必要である。

Fig. 13 Electromagnetic Force and Construction of Stator Coil End

ば、スロット内、エンドコイルともに電磁力を大略75%に低 減することができる。またこれは、ブッシング電流の低減に よりブッシングロッドやターミナルプレートなど大電流近傍 の構造物の過熱をも防止することになり,総合的な信頼性向 上に寄与する。

Fig. 14 Explosion Test of Hydrogen Gas

のボルトのロックなどの対策が必要であるが、さらに設備の 増強を行なって機内水素ガスの緊急放出、さらには窒素ガス の緊急封入を行なう場合もある。二次被害として水素ガスが 機内で(密封容器内で)爆発した場合には、図14のような爆 発圧力となり温度も 200℃ 程度までになりうることが、縮小 モデルにより実測されているが、一方、水素ガスの緊急放出 管を設けた場合でも放出に2分間以上を必要とし、膨大な設 備増強をした割合にはその効果が少ないのが問題点であり, 全機種には適用されない。

5 結 言

タービン発電機の重大事故を防止し、その信頼性を確保す るため日立製作所の採る基本的方針は、コンポーネントテス トである。すなわち、ロータシャフト、軸受、ウエッジ、固 定子コイル、フレームなど主要なコンポーネントの事前設計 のみにとどまらず,新設計点をクローズアップした実物大モ デルを事前に製作し、その性能を測定して設計計算値との比 較による確認を行なうと同時に長期間運転による信頼性確認 試験を行なうことである。さらに工場における組合せ試験時 にも,総合的な性能診断を行なうことである。

このような徹底した方針のもとで、今後とも大容量タービ ン発電機の設計製作に全力をあげる所存であり、ここに諸賢 のご指導ならびに、ご助言を請う次第である。

4 タービン発電機二次被害防止対策

6

前述したように,発電機の各部品は事前試作などによりそ の信頼性を十分に確認されたうえで組み立てられるが、万一 ロータ破壊などの大事故が発生したときにおいてもその被害 を最少に押える必要がある。このためには、水素ガス間欠補給 (常時は手動による間欠補給としておく方式), 軸受油ポンプ・ 密封油ポンプを停止するパニックボタンの設置、軸受まわり

参考文献

(1) 庄山,古山:「大容量タービン発電機の運転特性」日立評論 54, 310 (昭47-4) (2) 西, 川村:「原子力用タービン発電機」 日立評論 52, 106 (昭45-2)

(3) C.L.Linkinhoker ほか: "Influence of unbalanced currents on the design and operation of large turbine generators" IEEE Trans paper T73-012-2