

大容量タービン発電機に対する信頼性診断の進歩

Recent Development in Reliability Monitoring of Turbine-generator

最近、急速に大容量化の進められてきたタービン発電機の信頼性について見直しをしたいという意向が製作者側にも使用者側にもある。容量の増大により系統内に占める一機の比率が大きくなったこと、世界的にも大容量機のほうが事故停止率が大きいことがその主な理由である。

川村 隆* *Kawamura Takashi*
 渡辺 孝* *Watanabe Takashi*
 高橋 博* *Takahashi Hiroshi*
 松延謙次* *Matsunobu Kenji*

本論文は、発電機の信頼性確保のため製作者側として実施する確認試験や品質管理項目をはじめとして、運転中の発電機を微粒子モニタや軸振動分析により故障診断を行なう手法、更には世界の事故例よりみて定期検査時に重点的に実施しておかねばならない予防保全項目について述べる。現在、これらの予防保全項目の実施は、各電力会社の指導の下に軌道に乗ったところである。

1 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。

電力系統内での発電機の運用も従来以上に過酷となり、発電機の固定子・回転子の各コンポーネントはその使用限界に近づいた運用を余儀なくされつつあり、世界的にみても例えば回転子の破断等々の重大事故も発生している。

補修に長期間の停止と多額の費用を要するこれら重大事故の防止のためには、先行試作及び特性確認試験によりその信頼性が十分に確認された部品を用いて製作すること、工場試験・現地試験で十分にその特性を確認すること、更には運転に入った後でも各種の故障診断の手法により事故を極めて初期の段階で把握し、これに対処する措置を講ずることが重要である。

タービン発電機の信頼性確保のために、日立製作所が各電力会社の指導のもとに実施している診断手法、予防保全の手法の主要項目につき次に述べる。

2 発電機の事故停止率

世界的にみたタービン発電機の事故は、発電機の大容量化とともにその内容も変化してきているが、表1に示すように、軸材、保持環、ウェッジ、界磁巻線、スリップリングなどの回転子関係、鉄心、固定子巻線、口出端子、更には軸受などの固定子関係など発電機の主要部品すべてに及んでいる。部品は上記のほか水素冷却器、励磁機など多岐にわたるが、補修に長期間を要する重大事故となるのはやはり同表に示した主要部品である。

発電機の総合的な信頼性を最も端的に表現するのが事故停止率である。この事故停止率に関し、日立製作所製の国内向け及び輸出向け発電機に関する調査結果の統計を、米国内統計(EEI REPORT 1973-1974)と比較したものを図1に示す。

3 回転子の信頼性診断

回転子部品の信頼性の確認手法と、運転中のその診断方法について次に述べる。

表1 世界におけるタービン発電機の重大事故例 修理に多額の費用と期間を要する重大事故例を示す。

区分	重大事故	参考文献
回 転 子	1. 軸材の破断	文献 1)
	2. 界磁巻線エンド部用保持環の破断	文献 2)
	3. 界磁巻線保持用ウェッジの損傷	
	4. 界磁巻線の破断, 変形	
	5. 界磁巻線用ターミナルボルト損傷	
	6. 界磁巻線・層間短絡	文献 3)
	7. 軸振動過大	文献 4)
	8. スリップリング損傷	
	9. 回転子表面損傷	文献 5)
固 定 子	1. 固定子鉄心端部の焼損・破損	文献 6)
	2. 固定子巻線 溝内絶縁損傷	
	3. 固定子巻線 エンド部絶縁損傷	文献 7)
	4. 固定子巻線 相間わたり線損傷	
	5. 固定子巻線 水冷部品損傷・漏水	
	6. 口出端子部分 過熱	
	7. 口出端子部分 水素漏れ	
	8. 軸受 焼損	

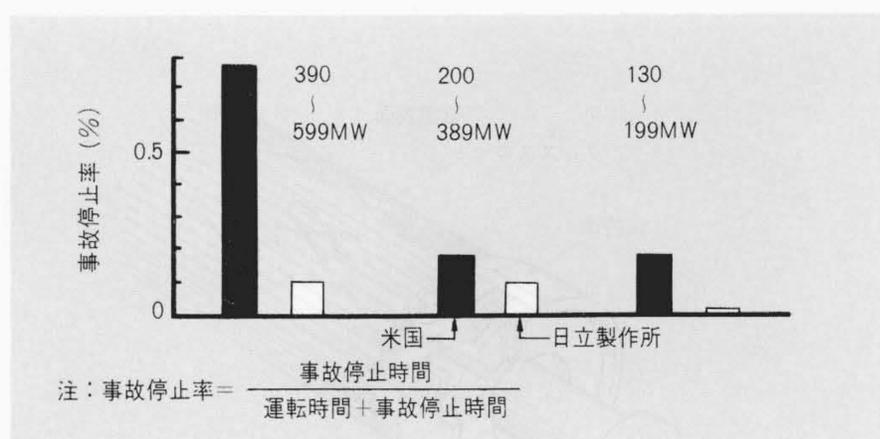


図1 タービン発電機の事故停止率 信頼性を、最も総合的、端的に表現するのがこの事故停止率である。

* 日立製作所日立工場

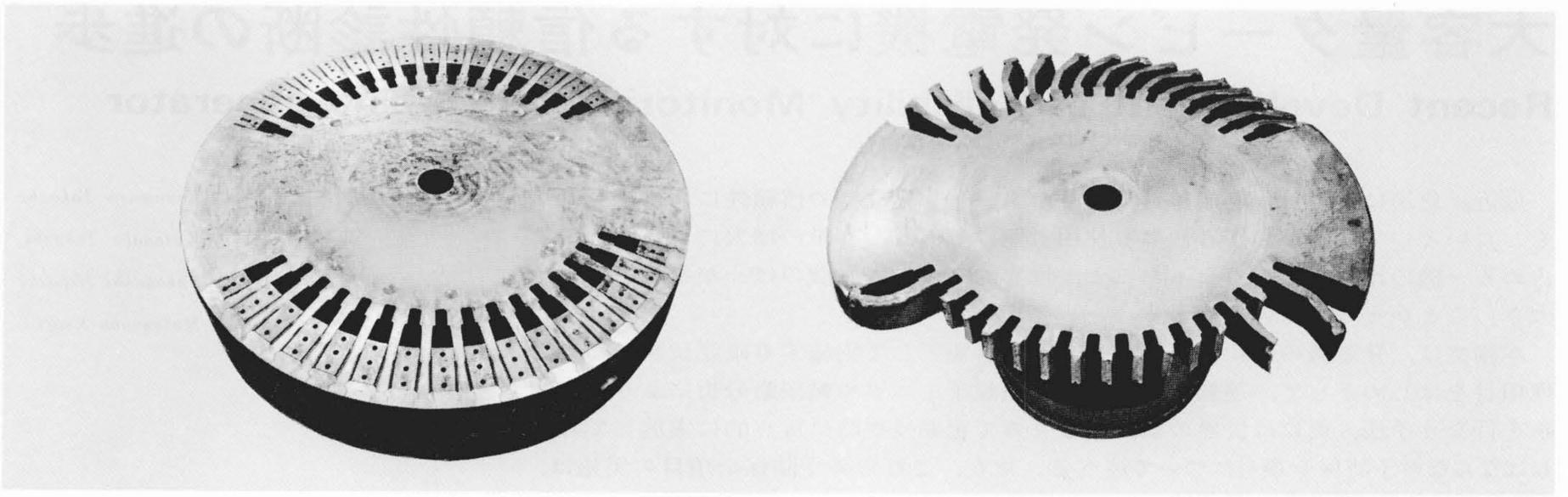


図2 実物大ロータ回転破壊試験 新設計機では、実機と同一断面で回転破壊試験を実施して、破壊形態及び回転数を確認できるように試験設備を常設している。

3.1 軸材の破壊防止

軸材そのものの内在欠陥の検出は、中心穴よりの超音波探傷、表面よりの高感度超音波探傷などの新手法により、従来より一段と確実になり、また非金属介在物をも含めてその進展の可否を破壊力学的に判定する手法⁸⁾も進歩し、例えば、文献1)にみられるような軸材そのものの内在欠陥による破壊は、今日では確実に阻止できるようになった。

しかし、非破壊検査が現在ほど進歩していなかった当時の発電機軸材に関しては、日立製作所は起動停止頻度の増大をも考えて定期検査時に最新の探傷手段により、内在欠陥の再確認を実施することを推奨しており、実施に移しつつある。

また、何と云っても軸材は最重要部品であり、新設計の大容量機の場合には図2に示すように実物大の回転破壊試験を実施してその安全性を確認することも多い。日立製作所の回転破壊装置は、防護壁をもつ真空タンク内で垂直軸を空気タービンにより15,000rpmにまで昇速させることができる構造で、発電機に対する信頼性確認設備の一環として日立研究所内に設備されている。

3.2 回転子表面及び内部点検

不平衡負荷運転時には、回転子表面の逆相磁界により倍周波電流が回転子表面を流れ、回転子ボデー端部などに損傷を生じさせることがある^{5)・9)}。通常は逆相電流リレーによりこれに対して保護されているが、それでもティース部とウェッ

ジ部の遠心力による接触の不均一により循環電流が局部集中をしたり、また、ティース部などに微小なりとも発錆がある場合はこれが大幅に助長されたりしてウェッジの損傷に至る場合もあり、日立製作所では運転開始後4年目には回転子外表よりの斜角探傷によるウェッジ診断を、また約8年目にはウェッジ全数抜出しによる目視及び実体顕微鏡による点検を推奨して万全を期している。8年目という値は、高温での高力アルミウェッジのクリープと疲労の重畳試験による亀裂の発生及び進展速度の結果より十分の裕度をもって定められたものであり、界磁巻線用保持環をも抜いて界磁巻線そのものをも点検する意図をもったものであり、積極的な予防保全策である。

また、電鉄負荷あるいはアーク炉負荷など、長期的な不平衡あるいは高調波負荷が予想される場合には、更に裕度を増すために制動巻線にほとんど大部分の表面循環電流を吸収してウェッジや回転子ティース部の焼損を防止する全長制動巻線(フルダンパ)方式があり、日立製作所での研究開発も完了して^{9)・10)}実用化されている。図3は、実物大試験装置を示すものである。

3.3 回転子のねじり振動による損傷防止

電力系統内で発電機よりみたインピーダンスの急激な変化は、それが短絡事故の発生、遮断、再閉路またその遮断などであれ、あるいは直列コンデンサや制動抵抗などの入切であれ、これらは発電機の電気トルクの変動やタービンと発電機

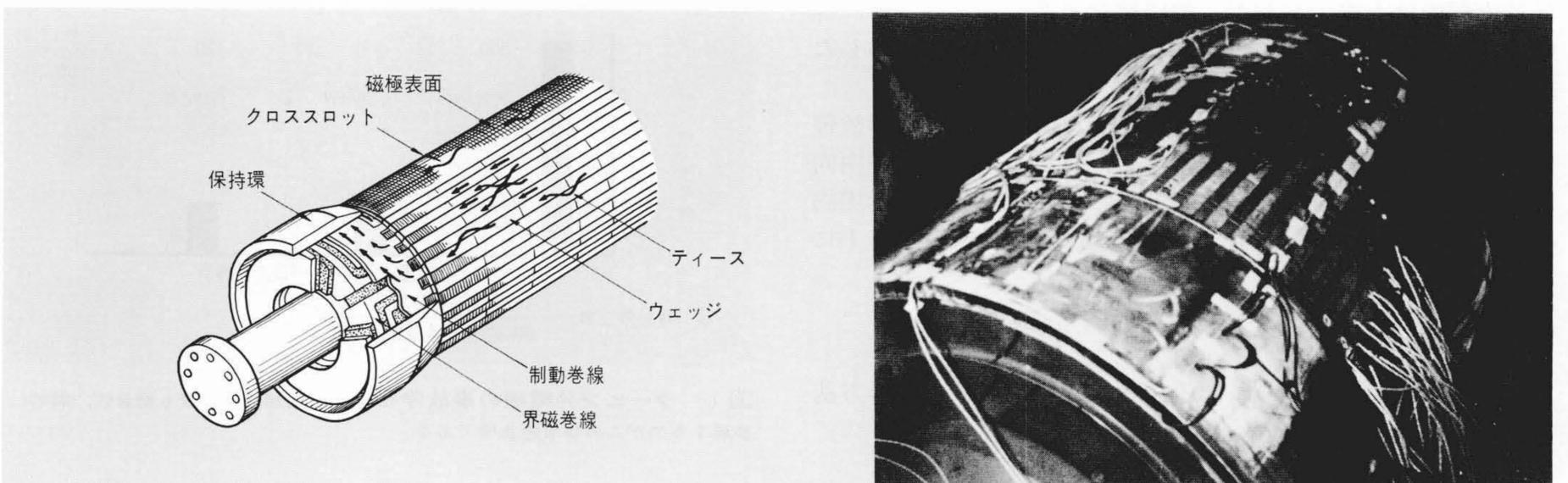


図3 不平衡負荷耐力の向上 電鉄負荷あるいはアーク炉負荷などに対するタービン発電機の耐力を向上させるため、新制動巻線方式を開発した。

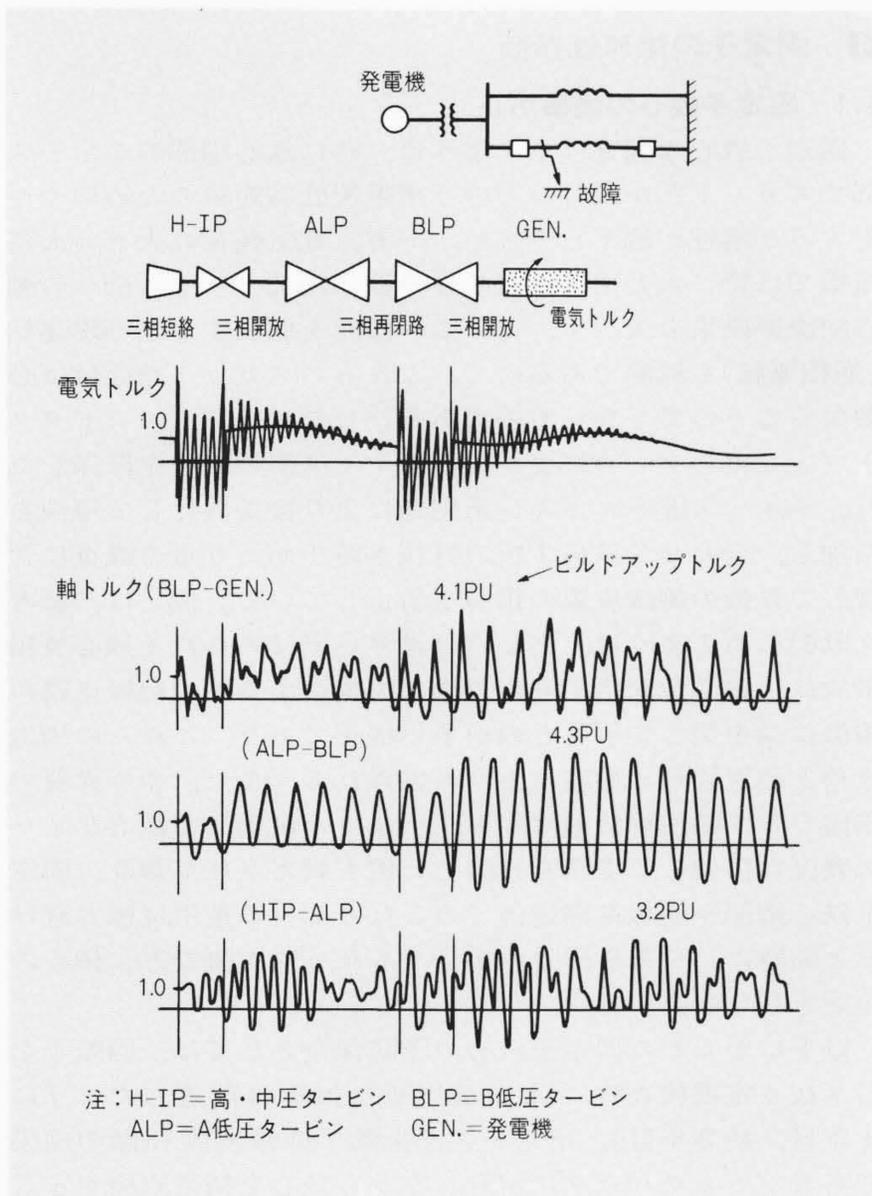


図4 再閉路時の軸トルクのビルドアップ 高速度再閉路は、遮断や再閉路のタイミングにより軸トルクのビルドアップをもたらすことがあり、その発生確率をも考慮して、慎重に採用の可否を定める必要がある。

の軸系にその固有振動数でのねじり振動をもたらす。2回線送電線での1回線での三相短絡事故、遮断、再閉路、更に事故継続による再遮断によるトルク動揺の例を図4に示す。ここで着目すべきは電気トルクの変動の瞬時的な位置であり、タイミングのいかんによっては電気トルク変動のたびに軸トルクがビルドアップしていくことである。最悪タイミングが継続すれば、この値は定格トルクの4～5倍にもなり得る場合もあり、この発生確率をも勘案しながら再閉路の可否は慎重に定められるべきであり¹¹⁾、例えば、三相再閉

路の低速度化、回数の制限などが必要となる場合もあり得る。

軸のねじり固有振動数に近い電氣的な励振が加わった場合には、上記再閉路の場合とは異なる高サイクル疲労の領域の問題となり、軸のねじり疲労破壊が報告されている¹²⁾。これらの場合には、直列コンデンサなどの系統条件を変更して電氣的な励振源を低減させることが有効であり、各種系統条件で運転中に発電機の相電流波形を測定、分析して低周波分の混入の検討を行なうことが出発点となろう。

3.4 軸振動による回転子診断

大容量機では、軸応力値の制限から軸径の増大だけにより対処することができず軸長を増大する必要があり、発電機軸はフレキシブルとなる。例えば、火力機であれば500MW級以上は図5に示すように発電機スパン内に2個の節をもつ三次モードとなる。このモードは軸長の短い低圧タービンや中容量機以下の発電機にはみられぬものであり、同相分ウエートに対する振動感度が増大するので、工場で精密バランスングを実施するのはもちろんのこと、現地でも付加的な軸曲りを生ずるような状況は避けるよう厳しく管理することが重要である。例えば、低圧タービンと発電機の直結の場合でも、三次モードである発電機軸のほうの新たな軸曲りを最小にして、現地での同相分バランスウエートを最小にするような直結方法を採用しているし、また、新設計大容量機の場合には図6に示すように低圧タービンと発電機軸の直結試験をも工場で行ない、信頼性の確認を行なうこともある。更に発電機軸自身の熱的な軸曲りを生ずる原因となる界磁巻線の層間短絡、通風不平衡及び回転子ウェッジのはめ合い固さの不平衡に関しては、工場及び現地試験の過程で図7に示すように十分にチェックされるし、またラビングなどを配慮したなじみ運転も現地にて実施される場合がある。

回転子の精密診断は、前述したように約8年目の定期検査時に実施するものであるが、運転中での診断は軸振動の状況から行なうことができる。図8で軸振動値の振幅A、周波数F、位相D、条件変化Cの4項目の組合せより診断を行なおうとするものであり、例えば、振幅も不規則変化で周波数は回転成分であり、位相変化も任意で、油温変化に影響されるような軸振動がみられるときは、給油量不足が原因で不規則脈動振動がでるといように判定する方式である。

従来は界磁巻線温度程度しか監視できなかったが、最近ではこれら軸振動の変化により回転子内部の状況変化を早い時期に推定して次回定期検査時の作業内容を定めるといように予防保全の方式が進歩しつつある。

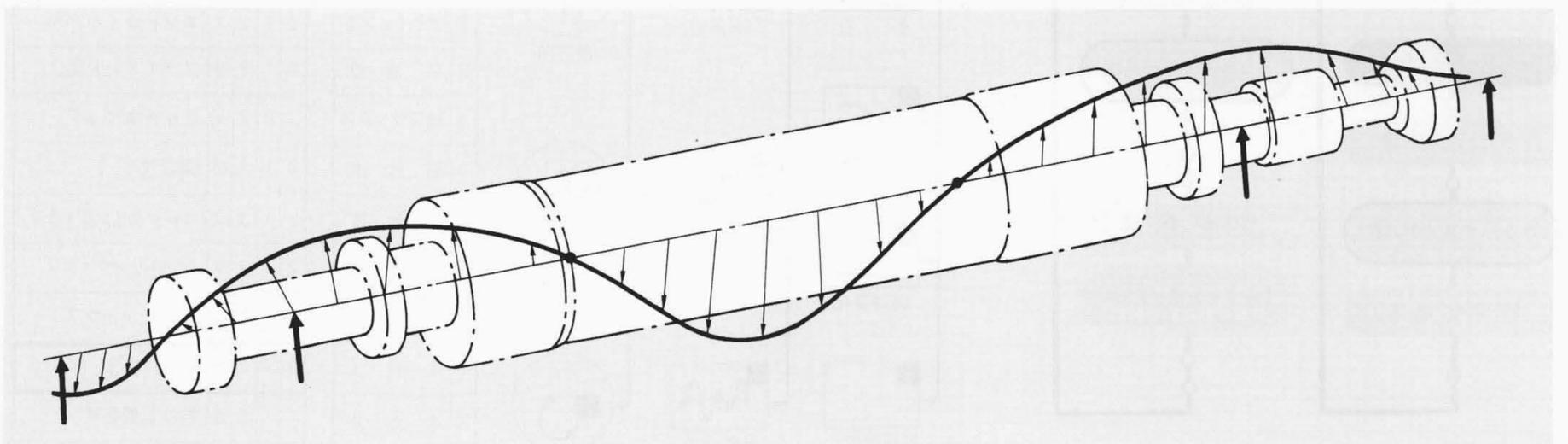


図5 大容量タービン発電機の軸振動モード 500MW以上の火力機の場合には、三次の振動形態となって、低圧タービンや中容量発電機よりも更に細かい振動管理を要する。

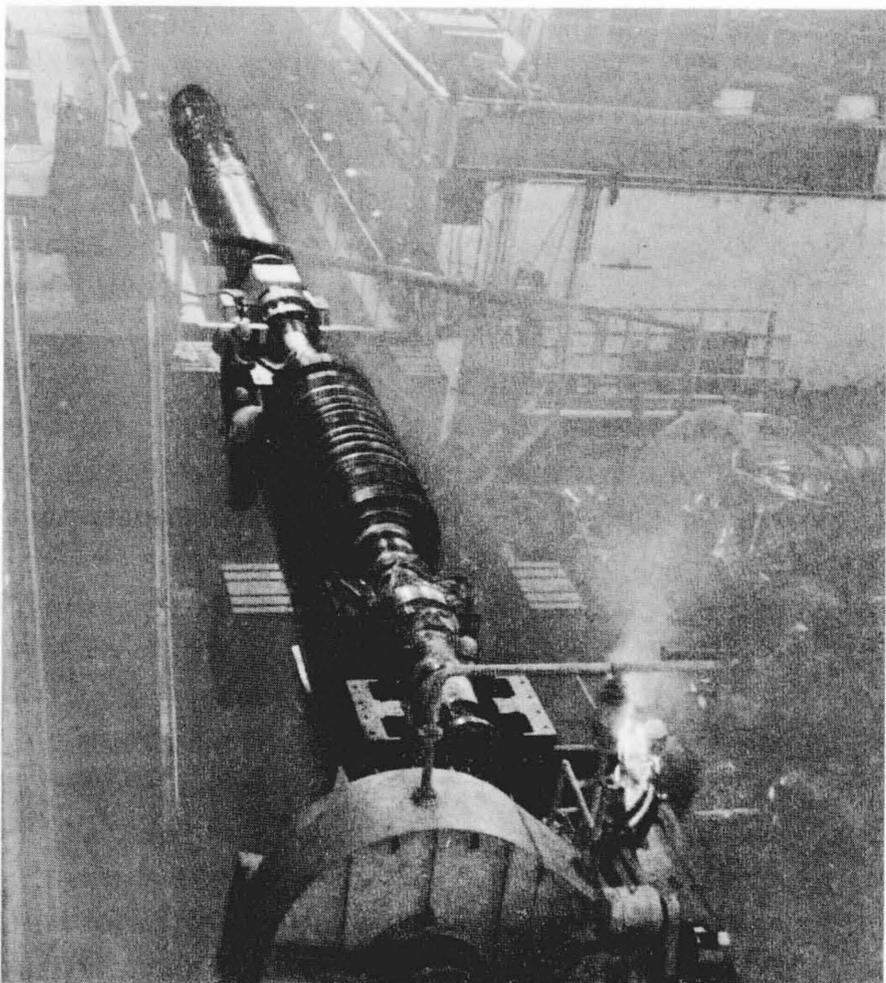


図6 工場内での低圧タービンと発電機軸の直結試験(組立中)
新設計機の場合には、低圧タービンと発電機軸の直結試験を工場内で実施して、信頼性確認を行なうこともある。

4 固定子の信頼性診断

4.1 固定子鉄心の焼損防止

固定子鉄心は図9に示すように、特に鉄心端部のティース部でスリットとか段付などのうず電流低減対策のためにややもすると剛性が低下しやすい。一方、電気装荷の大きい大容量機では特に火力用二極機でこの鉄心端部ティース部への軸方向漂遊磁束も大きく、更にこの傾向を助長する低励磁運転(進相運転)も頻繁であるので、これらのスリットや段付は必要欠くことのできないものである。したがって、エンドダクトフィンガのテーパにより特にティース部の面圧を確保したり、ティース部をエポキシ系樹脂により接着固化して剛性を増加し、合わせて鉄板1枚の打抜き時のかえり量を厳重に管理して鉄板の絶縁皮膜の損傷を防止している。例えば、参考文献6)にあるように、あるいは世界各国にみられる鉄心焼損事故は、鉄心や固定子巻線の過大振動による鉄板絶縁皮膜の損傷に端を発しているものが多い様子であり、これらの構造改善と品質管理の徹底により対処される。また、やや異質の原因として磁性材料のボルト、ナットが脱落して鉄心ティース表面に停留して皮膜を損傷した例も報告されており、固定子鉄心端部や巻線端部近傍でのこれら部材の使用は極力避けると同時に、やむを得ない場合でもロック方法などに細心の注意を払う必要がある。

以上にかんがみ固定子鉄心の予防保全としては、回転子を引き抜く定期検査時に(日立製作所の推奨は前述したように4年目、約8年目)、ティース部振動・絶縁皮膜損傷の結果であるブラックパウダに留意しながら鉄心を精密点検することが重要である。

4.2 固定子巻線の診断

固定子巻線の絶縁物の損傷例は世界的にも多数報告されているが、熱膨脹、収縮に伴う損傷¹³⁾の例は絶縁ワニスにアスファルト系のものを用いていた時代のものであり、近年のポリエステル又はエポキシワニスによる接着強度の高い絶縁層の場合には報告されていない。日立製作所の場合には真空含浸加圧注入のB種コイル(商品名:スーパーハイレジンコイル)の場合にも、プリプレグ・レジンリッチ方式のF種コイル

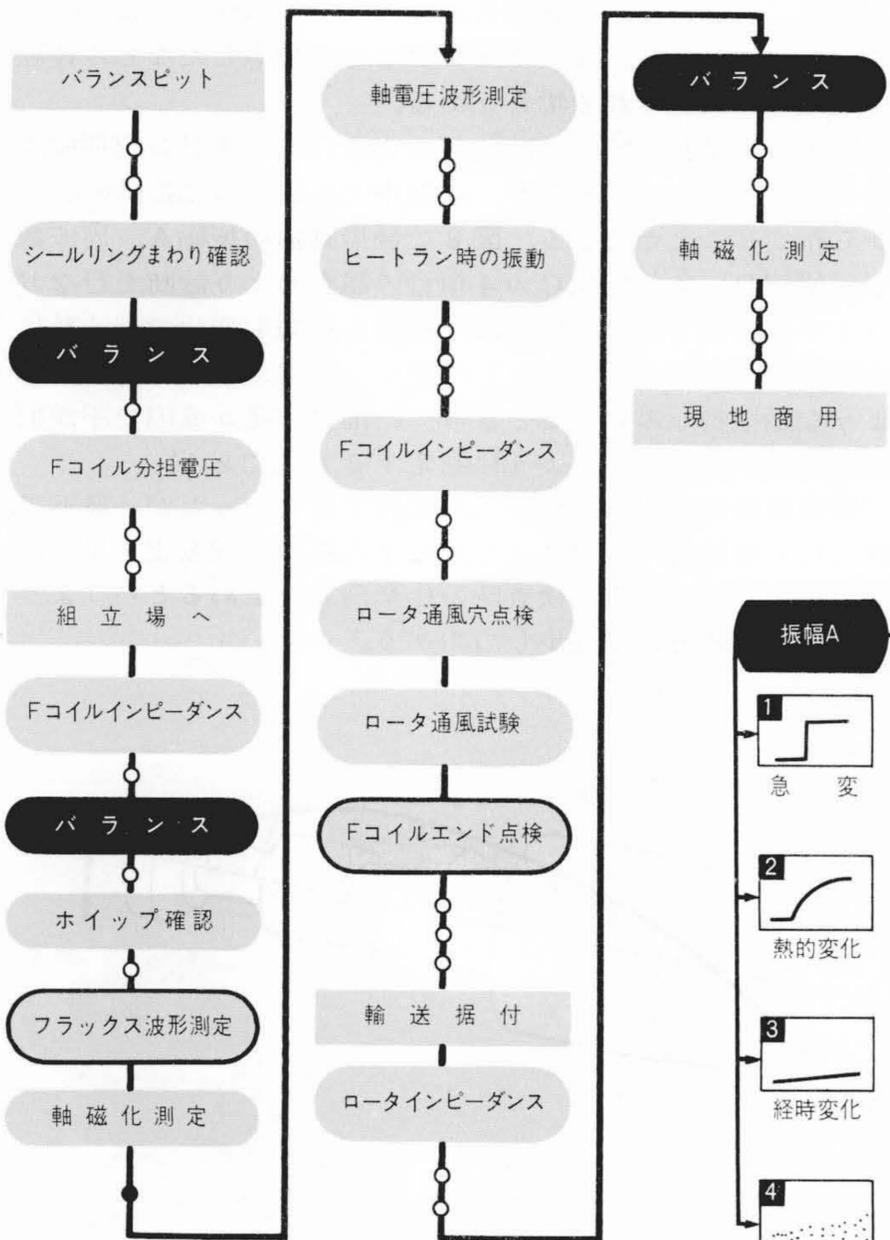


図7 回転子の軸振動管理フローチャート 工場内、現地での回転子の品質管理の一環としての軸振動管理のフローチャート(重点部だけ)を示す。

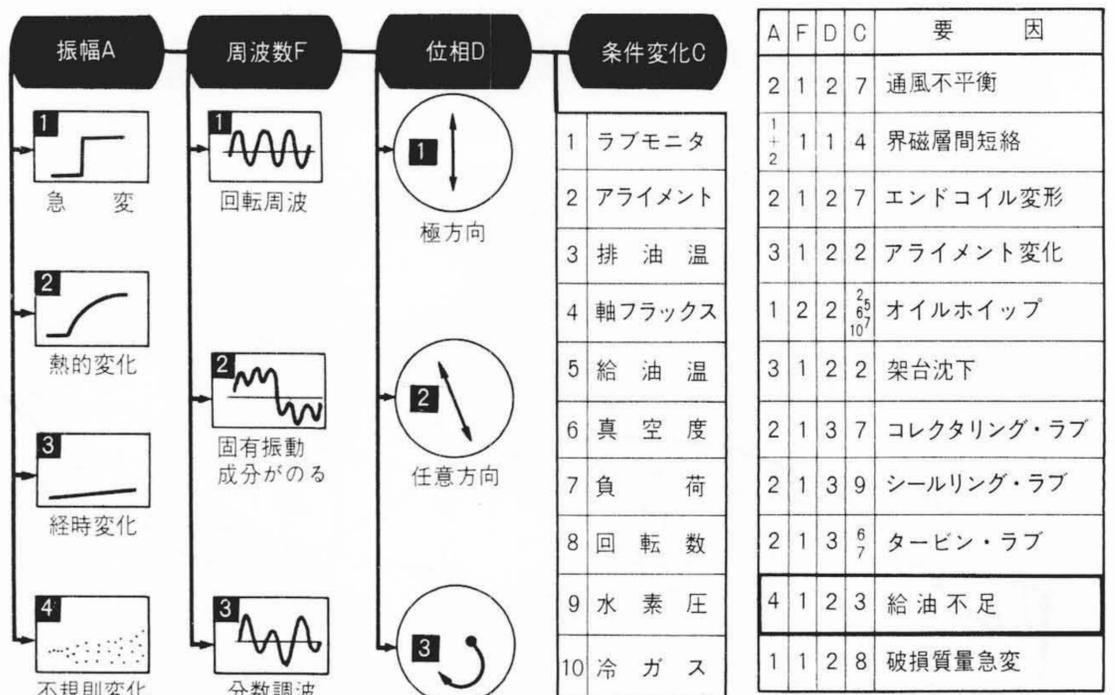


図8 軸振動状況からの回転子の診断 軸振動の状況の微小な変化から回転子内部の状況変化を診断し、予防保全のデータを運転中に得ようとするものである。

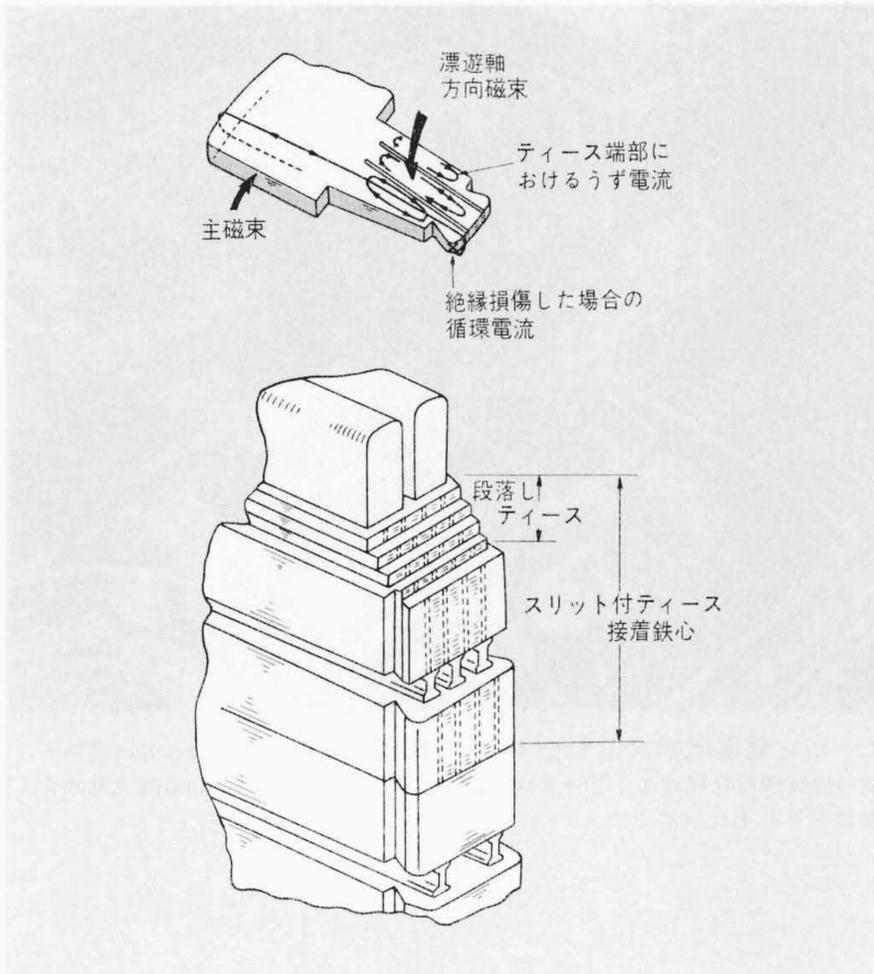
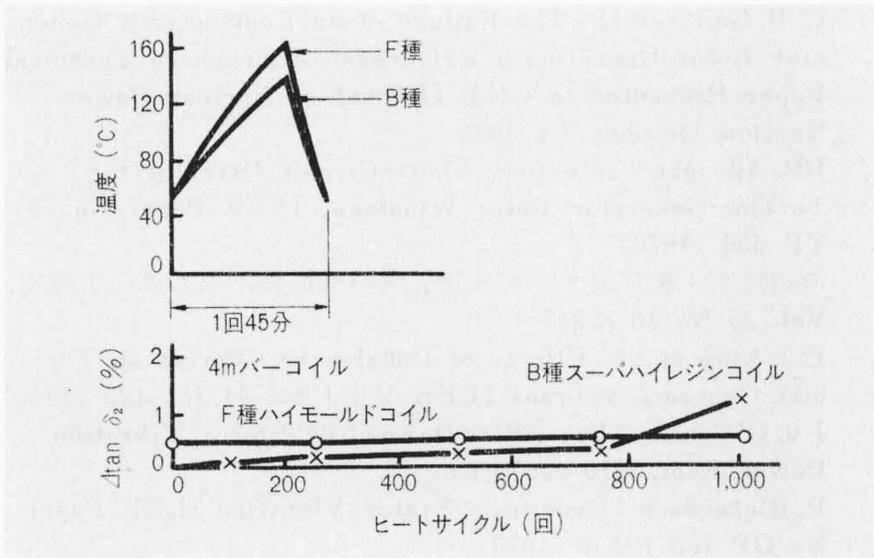
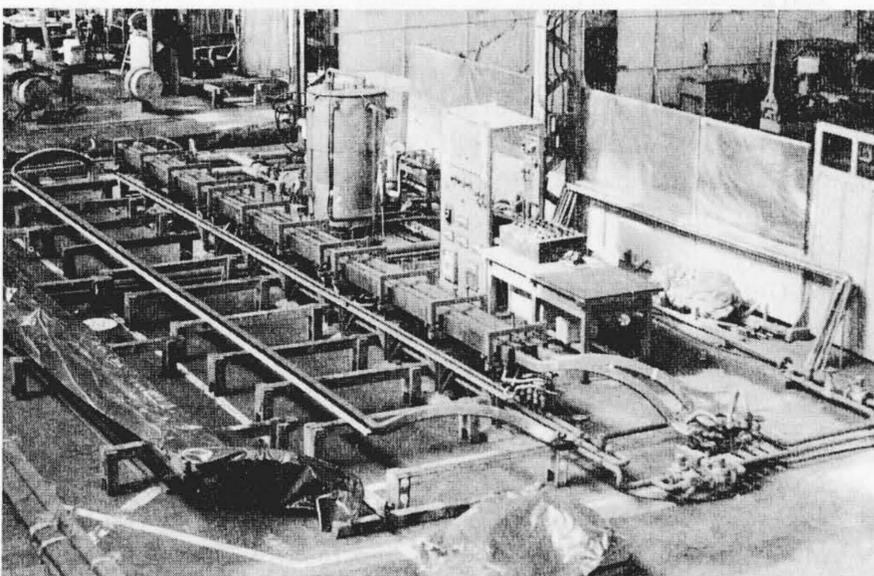


図9 固定子鉄心の絶縁損傷による焼損 固定子鉄心の絶縁皮膜が損傷した場合には循環電流による焼損に至ることがあり、剛性を確保した構造と厳しい品質管理が要求される。

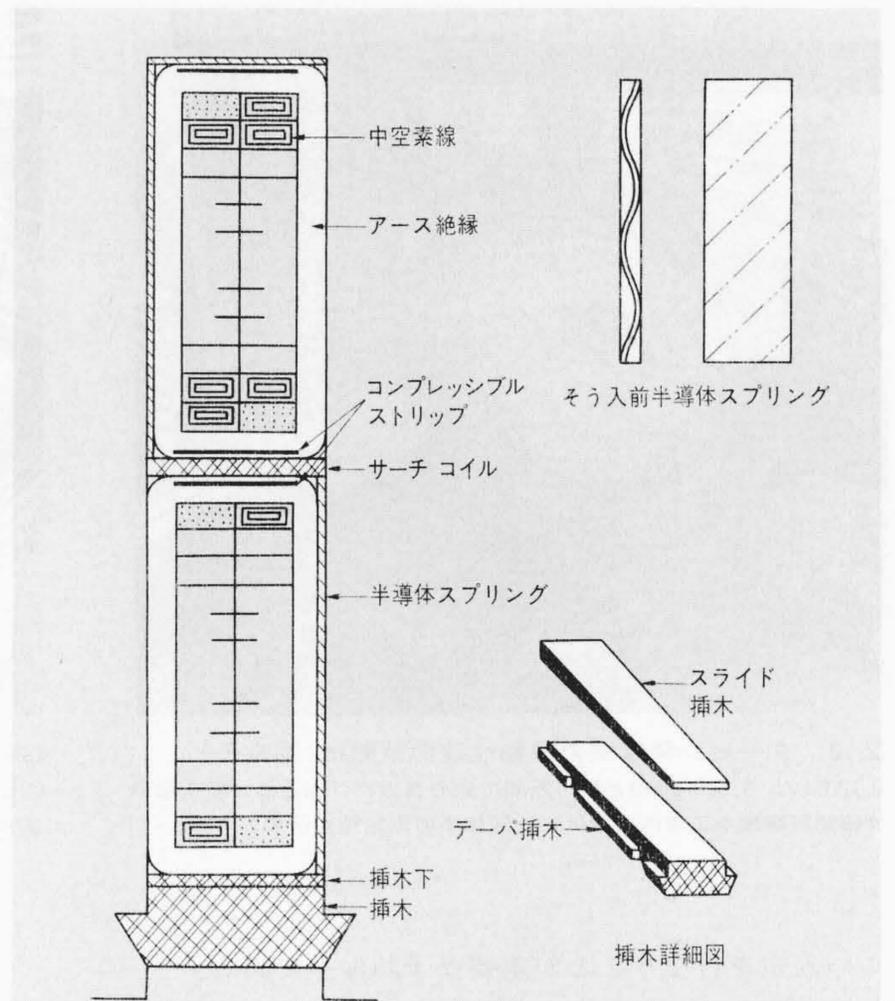


(a)

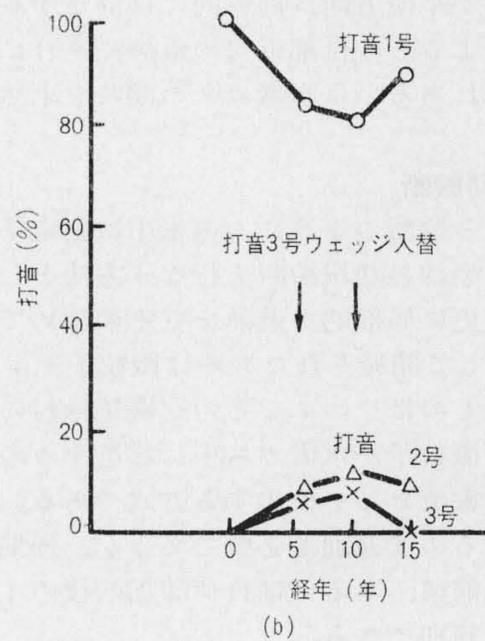


(b)

図10 超大形コイルのヒートサイクル試験 起動停止、負荷変化の頻繁な最近の大容量機の固定子コイルに対し、実機より過酷な状況でヒートサイクル試験を実施し、信頼性の確認を行なったものである。



(a)



(b)

図11 固定子コイルのスロット内固定 (a)はコンプレッシブルストリップとテーパー挿木でスロット深さ方向の、半導体スプリングで幅方向のしっかりした固定を行ない、振動を止める。(b)は特別のスロット内固定法を実施していない機種では、ウェッジゆるみの経年変化追跡により定期検査時に予防保全を実施してきた。

(商品名：ハイモールドコイル)の場合にも図10に示すように1,000回に及ぶ過酷ヒートサイクル試験を実施して、接着のはがれなどによる内部ボイドの形成に対応する指標である $\Delta \tan \delta_2$ の変化を測定し、起動停止頻度の大きい発電機に最適なことを確認している。

固定子巻線のもう一つの損傷は倍周波の電磁振動によるものであり、例えば、スロット内で振動すれば局部的な静電荷の断続的放出を伴うため絶縁が損傷することがあり、図11(a)に示したような方策によりスロット内の深さ方向、幅方向両方の固定を行なうのが有効である。電磁力が小さいためこれらの方策を講じていない機種でも同図(b)に示したように、固定子ウェッジのゆるみの経年変化を追跡して必要な時点でゆるいウェッジの交換を行なうことによりスロット内へのコイ

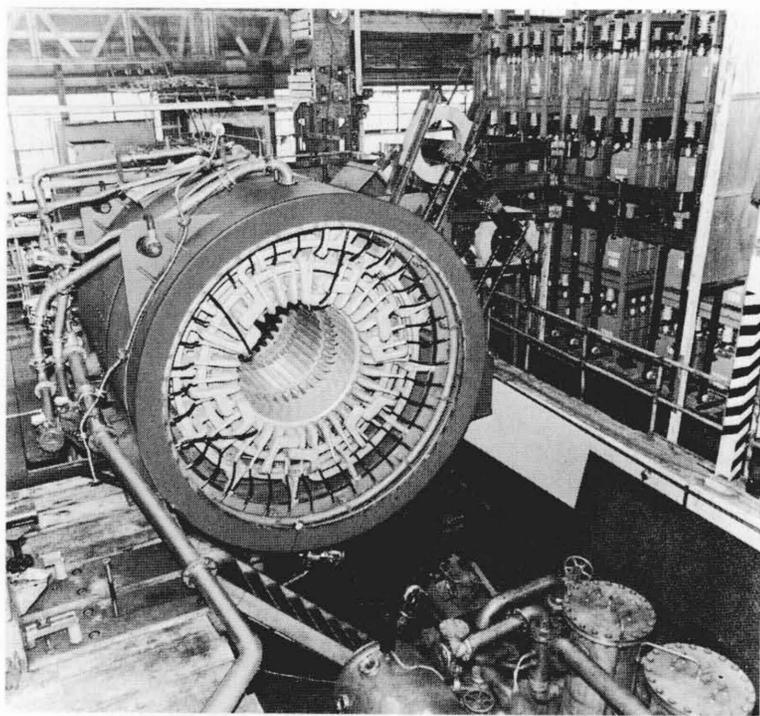


図12 タービン発電機の信頼性確認試験機(固定子)
1,120MVA 3,600rpm機と同一断面で鉄心長さだけ詰とした総合信頼性確認試験機を工場内に設けた。図はその固定子を示す。

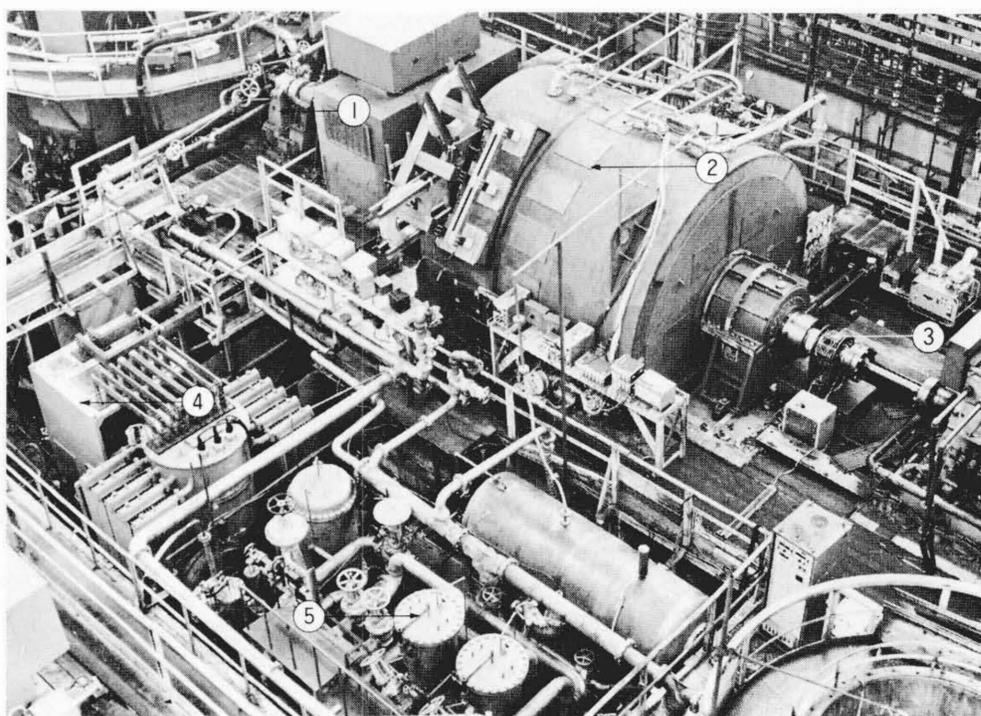


図13 タービン発電機総合信頼性確認試験機の全貌 ①は冷却水装置を、②は総合信頼性試験用発電機を、③は多段切替測定器を、④は200V 10kA直流電源を、⑤は純水装置をそれぞれ示す。

ルの固定を行なうことが重要な予防保全である。

振動防止は、巻線エンド部においても劣らず重要であり、軸方向の熱伸びは許すが半径方向、周方向には固定する方式が最善で、振動過大によるろう付部近傍の亀裂やそれによる固定子巻線冷却水の漏れあるいは水素ガスの漏れを未然に防ぐことができる。

4.3 固定子焼損の早期診断

回転子の軸振動による診断のように、運転中に固定子の状況、特に固定子鉄心と巻線の状況診断を行なう方法として各部の温度監視がある。更に局所的な過熱をもその極めて初期の段階で検出しようとして開発されたものに微粒子モニタ¹⁴⁾がある。日立製作所のものはワニスなどの有機絶縁材の熱分解による $0.1\mu\text{m}$ 以下の微粒子が水素ガス中に浮遊するのに荷電して、微小のイオン電流として検出する方式である。機内への漏油水をも検出するので識別が必要であるが、長期間連続監視すれば電圧出し前後、あるいは負荷印加前後のイオン電流の変化より故障を判別できる。

5 結 言

以上、主要部品ごとの信頼性診断手法について述べた。工場内でコンポーネントごとに開発し確認する方式は、既報参考文献¹⁵⁾の延長であるが、運転中の固定子、回転子を診断する方式をつけ加えたこと、また定期検査中の精密点検内容を定めて積極的に予防保全を期す点が新しい内容である。これらは、各電力会社の尽力を得て発電機の精密点検による予防保全という形で軌道に乗ったことは喜ばしい。

更に、コンポーネントだけではなく、発電機全体の総合信頼性の確認用設備として、容量1,120MVA、回転速度3,600rpm機と同一断面で鉄心長さだけを詰に縮小した設備をこのほど工場内に設けたことを付記する。固定子は図12に示すようなもので、回転子は現状では完全水冷却方式のものが組み込まれている。設備の全景は図13に示すとおりであり、新規開発したコンポーネントは本機内に組み込まれて試験され、発電機全体からみた信頼性をも検討できるようになった。

今後ともタービン発電機の信頼性確保に全力をあげる考えであり、ここに諸賢の御指導及び御助言を請う次第である。

参考文献

- 1) C. Schabtach et al : Report of the Investigation of two Generator Rotor Fractures ASME Paper No. 55, A, 208 (Nov. 1955)
- 2) C. B. Golly et al : The Failure of an Endring of a Generator Rotor Operating in a Hydrogen Atmosphere Technical Paper Presented to CEA Thermal & Nuclear Power Section, October 7th 1975
- 3) DR. Albright : Interturn Short-Circuit Detector for Turbine-Generator Rotor Windings : IEEE Paper No. 70 TP 656 (1970)
- 4) 渡辺ほか : 大容量タービン発電機の軸振動, 火力原子力発電, Vol. 25 No. 10 p. 947
- 5) E. I. King et al : Effects of Unbalanced Current on Turbine-Generators Trans. IEEE Vol. PAS-84 121-125 (1965)
- 6) J. J. O'Connor : Big Allis' Downed by Stator Vibration Power, Sept. 1970 p. 62~64
- 7) P. Richardson : Generator Stator Vibration IEEE Paper No. CP 186-PWR (1970)
- 8) K. Kumeno, et al : Defects and Fracture Strength of Large Rotor Forgings for Steam Turbine ASME Paper No. 75-PWR-10
- 9) N. Takahashi et al : Improvement of Unbalanced Current Capability of Large Turbine Generators IEEE Trans. PA & S, Vol. PAS-94 p. 1390~1400 (July/Aug. 1975)
- 10) N. Takahashi et al : Unbalanced Loading Capabilities of Large Turbine Generators Hitachi Review Vol. 25 (1976) No. 2
- 11) M. Goto et al : Influences of High Speed Reclosing on Turbine Generators and the Shaft System IEEE Summer Power Meeting (1977)
- 12) E. J. Colin : Understanding Subsynchronous Resonance IEEE 1975 Summer Meeting Synchronous Resonance Symposium
- 13) J. G. Kuzawinski : A New Look at Reliability of Asphalt Mica Insulation in Large Conventionally Cooled Turbine Generators IEEE Trans. PA & S Vol. 89 No. 6 p. 1022
- 14) 大塚ほか : 微粒子モニタによる発電機内雰囲気監視, 火力原子力発電, Vol. 27 No. 12 p. 35
- 15) 川村ほか : 大容量タービン発電機の信頼性, 日立評論, 55, 669 (昭48-7)