

タービン発電機技術の進歩

森安 正司(もりやす しょうじ)

三村 一郎(みむら いちろう)

小原 孝志(こばる たかし)

1 まえがき

近年、我が国の電力需要の伸びが鈍化するに伴い、電力設備については大容量化の追求のみならず、その経済性と信頼性の確保がますます重要な課題となっている。

タービン発電機において、大容量化と機械の縮小化は主として冷却方式の改良に基づく技術進歩によって行われてきたが、これによって機械内部の損失密度が増大するので、信頼性を低下させる要因となる。

また、系統運用上の要求により実施されている高速度再閉路、DSS 運転、速応励磁運転、進相運転、高調波不平衡運転などによって、機械の負担はますます大きなものとなっており、前述の損失密度の増大と相まって従来技術の単なる延長では信頼性確保ができなくなっている。

これらの信頼性低下要因に打ち勝ち、信頼性と安全性の高い運転を行うために、理論と実験の両面で検討が加えられ、更に製造面での信頼性向上策が施されるとともに、機械の健全性を監視・診断する研究と開発が行われている。

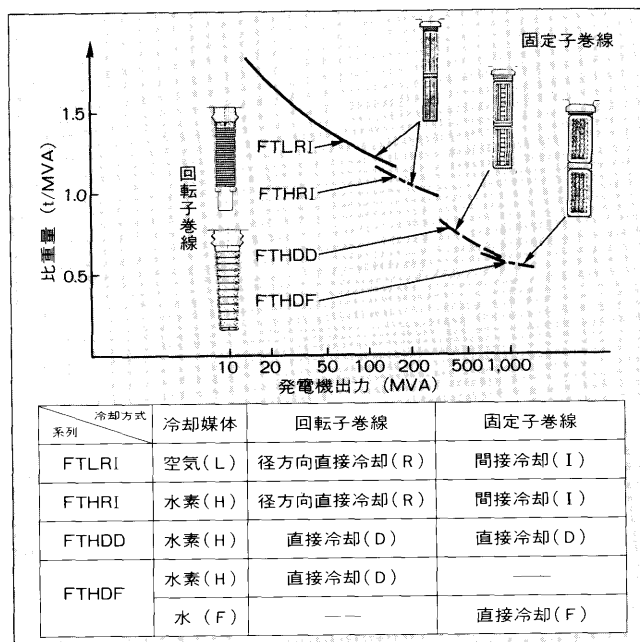
本稿では原子力発電とともに、今後の発電設備の主体となる300MVA から700MVA クラスの火力発電機に適する水素直接冷却形発電機を主体として、最近のタービン発電機の技術進歩について述べる。

2 発電機の系列

発電機の出力は、機械寸法の大小によるばかりでなく、巻線などを冷却する冷却媒体の種類とその方法、すなわち冷却方式によって決定される。現在の発電機出力の飛躍的な増大は、主に冷却方式の改良に基づく技術進歩により達成された。利用する冷却媒体を空気から水素ガス、更に水とし、また巻線の冷却を絶縁物や鉄心を介して行う間接冷却法から、媒体と巻線とを直接接触させる直接冷却法へと技術が進歩した。これらにより機械の利用率増大が図れ、図1に示す二極タービン発電機の比重量(t/MVA)が大幅に低下した。

二極タービン発電機は、その冷却方式によって次の3系

図1 二極タービン発電機の比重量



列に大別される。

2.1 空気冷却系列 (FTLRI)

主に自家発電用として製作され、出力170MVAまで製作可能で、富士電機の製作実績は現在105.8MVAである。

2.2 水素冷却系列 (FTHRI, FTHDD)

発電機出力によって、更に2系列に分けられる。出力300MVA以下は、固定子巻線間接冷却系列(FTHRI)、それを超える場合には固定子巻線直接冷却系列(FTHDD)としている。FTHRIの基本構造は、水素ガスにかかわる構造を除き空気冷却系列と同一である。

FTHDDでは、出力850MVAまで製作可能であり、現在670MVA機を設計中である。FTHDDの断面を図2に示す。固定子鉄心は、振動伝達や騒音を低減させるため、固定子枠に板ばねを介して固定される。水素ガスは、タービン側軸部のコンプレッサにより固定子及び回転子内部に循



森安 正司

昭和34年入社。大形回転機の設計及び開発に従事。現在、川崎工場主幹技師。工学博士。



三村 一郎

昭和47年入社。大形回転機の構造設計に従事。現在、川崎工場回転機設計部課長補佐。



小原 孝志

昭和49年入社。大形回転機の電気設計に従事。現在、川崎工場回転機設計部。

図14 タービン壁温度差監視装置の構成

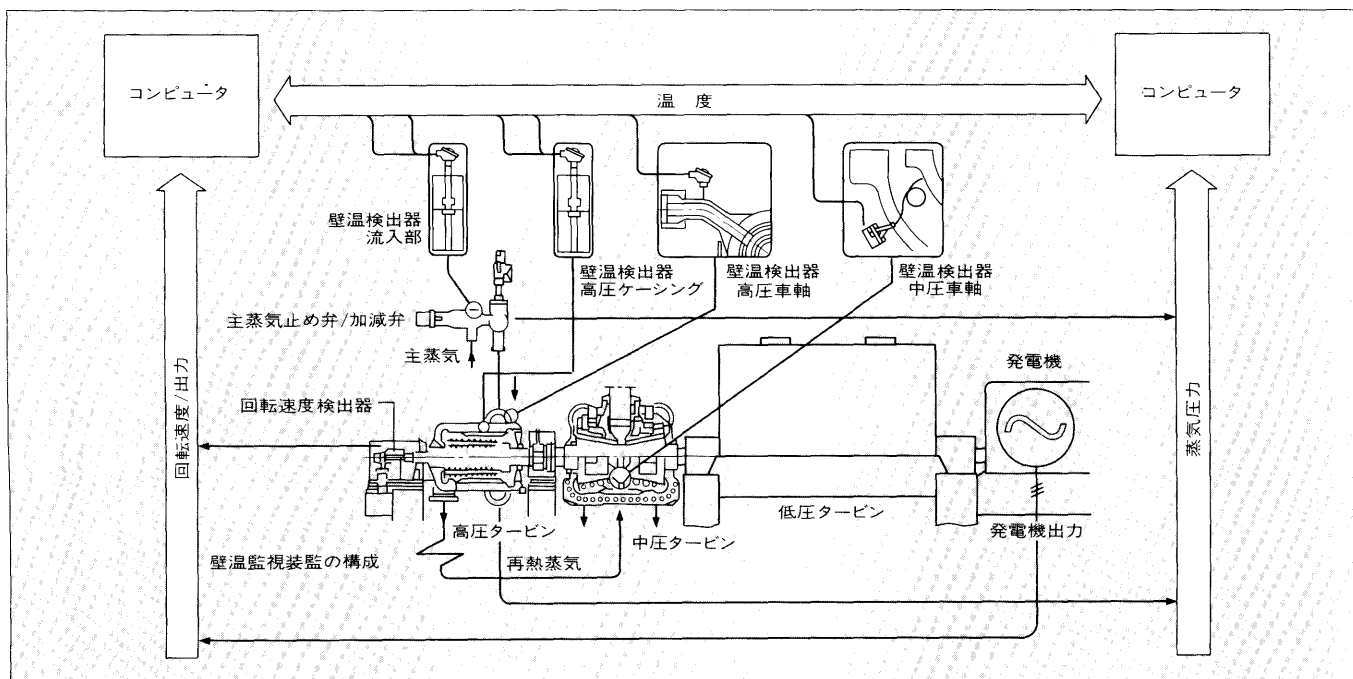
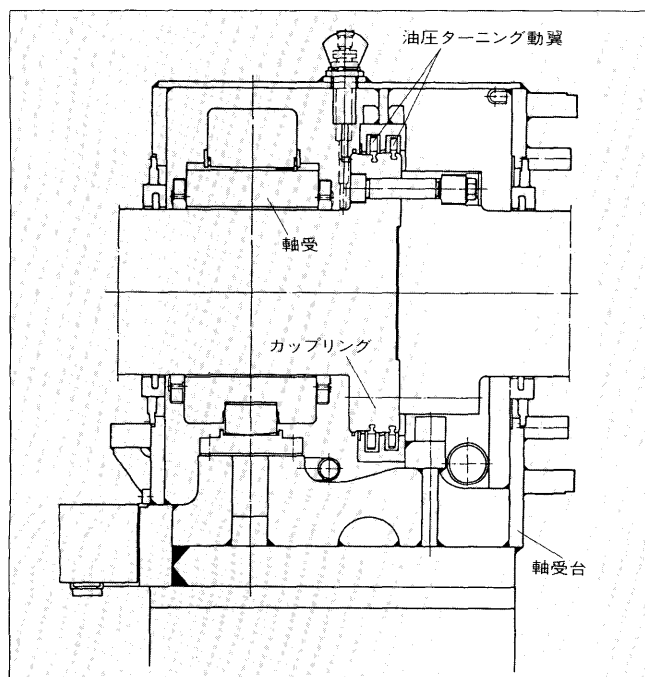


図15 油圧式ターニング装置の翼車断面図



自動的に行う壁温度差監視装置は、①主蒸気止弁ケーシング②高圧ケーシング③高圧車軸④中圧車軸の4点の同時監視を行う。コールド、ウォーム、ホットの3モードに対応して各4点の温度状態に対して設定された制限温度差を超えることがないように、タービンの昇速、負荷及びボイラの蒸気温度が自動的に制御誘導される（図14）。

(3) 高速油圧式ターニング

タービン車軸のカップリングフランジに直載する油圧タービンによって約100rpmの高速でターニングを行う構造

を採用している（図15）。ターニングの入・切は電動の給油弁の開閉だけで行えるので、操作が簡単で自動化も容易である。軸受は流体潤滑状態となるため油膜は厚く、タービン起動時に複雑な油温操作を必要としない。最新の大形機ではターニング中の車軸を約200kg/cm²の油圧で連続ジャッキアップすることにより、軸受保護をより確実にしている。

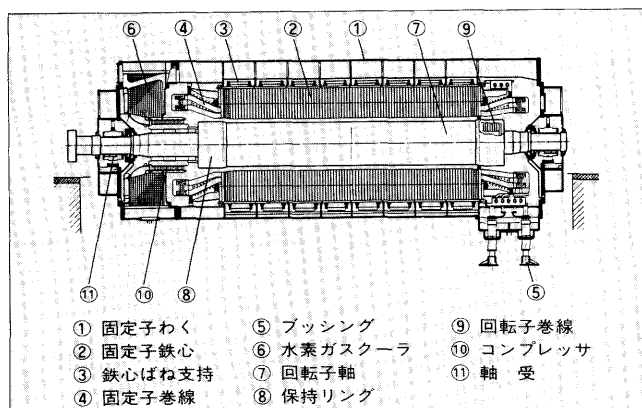
5 あとがき

ユニットの起動・負荷特性は、一般にタービンの設計が良ければタービンによって制限を受けることはない。高圧高温化、及びサイクリックな運用といった要請に適した、高圧部につば形タービンを配した高・中圧タービン独立構造など、従来から富士電機が一貫して採用してきた諸技術の最新の状況の概要について述べた。

参考文献

- (1) 西岡良三ほか：蒸気タービンの高効率化，富士時報，Vol. 54, No.11, p.721-730 (1981)
- (2) Haas, H. et al. : Turbines for Advanced Steam Conditions—Operational Experience and Development, The First International Conference on Improved Coal-Fired Power Plants (1986)
- (3) Ewald, J. et al. : Rotor Life Evaluation—U.S. and European Practice, EPRI Workshop on "Life Assessment and Improvement of Turbo-Generator Rotor for Fossil Plants" (1984)

図2 タービン発電機 (FTHDD) の断面図



環される。励磁方式はブラシレス形が標準である。

2.3 水冷却系列 (FTHDF)

適用出力の多くが FTHDD と重なる。出力 850MVA 以下では、輸送制限、顧客指定などの事情が有る場合に適用している。

③ 信頼性向上化技術

3.1 高頻度起動停止運転

高頻度の起動停止によって、発電機の各部品には遠心力、あるいは温度変化による繰返し荷重が作用し、その寿命が消費される。西ドイツ電気事業連合会 (VDEW) では、発電機の定期点検間隔の目安とする等価運転時間を、次式により評価している。

$$\text{等価運転時間 } T_a = T_B + 20 \cdot N \quad (\text{h})$$

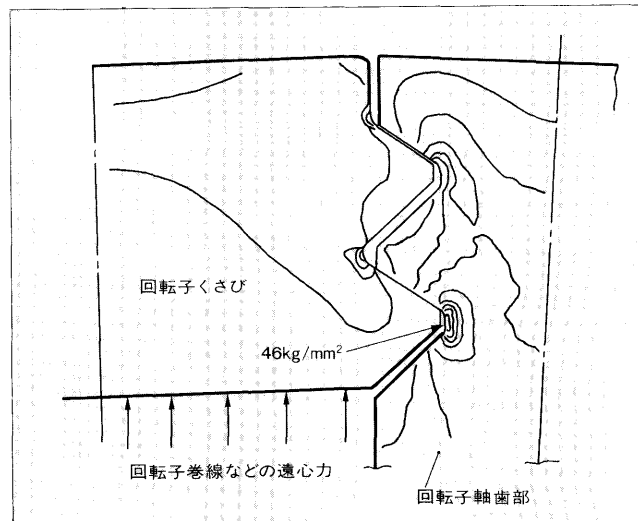
T_B : 実質運転時間 (h), N : 起動回数

すなわち、1 年間少なくとも毎日 1 回の起動を行う場合、起動停止が機械に与える影響は、ほぼ 1 年間連続運転する場合と同等であると評価される。これにより、起動停止運転の機械に与える影響の大きさが分かる。前述の VDEW によれば、回転子引抜きを伴う点検として、運転開始後第 1 回目を $T_a = 10,000 \sim 20,000\text{h}$ とし、第 2 回目以降を $T_a = 40,000 \sim 60,000\text{h}$ ごとに実施することを推奨している。IEC34-3 (タービン発電機) では、少なくとも 3,000 回の起動に耐え得る設計とすることが規定されようとしている。富士電機では、き裂発生をもって部品の寿命と考え、少なくとも 10^4 回の起動に耐えられる設計を行っている。以下に、主要な回転部品についての信頼性向上策を述べる。

3.1.1 回転子軸

軸胴部には、回転子巻線などの遠心力を保持するために、軸歯部に溝を設けてくさびが挿入されている。更に軸端部では、巻線端の遠心力を支える保持リングが焼ばめられている。このため保持リング焼ばめ部では、停止時にリングの焼ばめによる圧縮荷重が作用し、運転時には巻線、くさびなどの遠心力の作用が加算されるので、応力の集中する軸端の歯くさび溝部の応力振幅は軸中央部のその約 1.7 倍となり、条件が最も厳しい。

図3 回転子のくさび部の応力分布



更に、大形鍛鋼品である軸材には、超音波探傷検査では検出できない微小な内在欠陥が存在する可能性がある。破壊力学で知られるごとく、荷重が繰返し作用すると欠陥は成長し、限界寸法に達すると軸は脆性破壊する。軸胴端部には界磁リード用軸中心穴が設けられているので、同様に軸の中心穴近辺の応力振幅は大きくなり、許容起動回数は中心穴のない軸胴中央部の約 1/10 に低減する。主な信頼性向上策は次のとおりである。

- (1) 有限要素法などを用いた計算精度の向上：一例としてくさび溝部及びくさびの応力分布を図 3 に示す。
- (2) 実寸法モデル変形量の実測による計算精度の検証
- (3) 総形バイトの採用によるくさび溝加工精度の向上
- (4) 高破壊靱性を有する NiCrMoV 鋼の採用

3.1.2 回転子くさび

回転子巻線の遠心力を支えるくさびには、不平衡負荷時や系統故障時に交流電流が流れ、これによってくさび温度が上昇する。このため、くさび材には高強度で導電率が大きく、かつ高温での強度低下の少ないものを選定している。FTHDD では 2 段歯くさび (図 3) を用いているが、下側の歯付け根部での応力振幅は上側のそれより約 20% 大きい。また、歯付け根の曲率半径 (R) は 2mm を標準とするが、これが 1mm の時には応力振幅が 20% 程度増加するので R 寸法の管理は重要となる。主な信頼性向上策は次のとおりである。

- (1) 実寸法モデルによる静的及び疲労強度の確認
くさびの 2 段歯のうち、下側の歯だけで支えた場合でも、繰返し数 10^4 回では、き裂が発生しないことを確認した。
- (2) 総形バイトの採用によるくさび加工精度の向上
- (3) 高強度、高導電率ベリリウム銅材の採用

3.1.3 回転子巻線端 (コイルエンド) の極間渡りコイル

コイルエンド部では、各導体は互いに銀ろうにて接合されて磁極を形成している。更に、磁極間を接続するために極間渡りコイルが設けられている。運転時には、コイルエンドの遠心力によって保持リングが 1mm 程度拡大するので、コイルエンドも径方向に動く。遠心力による拘束力が

大きいと、極間渡りコイルは保持リングの動きに相应して変形する。起動停止の繰返しにより渡りコイルの変形量が大きくなること、コイルの損傷だけではなく、短絡に発展する場合がある。主な信頼性向上策は次のとおりである。

(1) 下渡り極間渡りコイルの採用

極間渡り材には最内径側にて磁極間の接続を行い、遠心力の低減を図った。

(2) とも材の使用と無焼鈍成形の実施

極間渡りコイルはコイルと同じ材料（形状と材質）を用い、途中に接続箇所のないいわゆる「とも材」を用いる。また、焼鈍せずにコイルの成形を行って強度を確保する。

(3) ガス直接冷却による温度低減

極間渡りコイル内部にも水素ガスを流して温度を低減させ、強度の低下を防ぐ。

(4) テフロンコーティング絶縁板の採用

コイルエンド外径側絶縁のコイル接触面には、テフロンをコーティングし、摩擦係数の低減を図る。

3.2 逆相負荷運転

発電機が平衡した負荷に電力を供給している場合には、電機子電流は正相分電流だけであり、これによって生ずる電機子反作用磁界は、回転子に対しては直流磁界である。ところが、負荷に高調波が含まれたり不平衡である場合、また短絡や系統故障が生ずると、発電機電流には正相分電流以外に逆相分電流や直流分電流が含まれる。これらによって生ずる磁界は、回転子にとって交番荷重となるため、回転子表面に交流電流が誘導されることになる。

回転子は本来、直流磁界を対象として設計された構造なので、交番磁界によって生ずるいわゆる逆相電流に対しては、おのずと許容できる限界がある。逆相電流によって生ずる回転子の電流の大きさを制限するものは、保持リング、くさび、ダンパ巻線及び回転子鉄心表面の過熱である。

連続逆相負荷としては不平衡負荷と高調波負荷があり、短時間逆相負荷としては発電機端子での二相突発短絡が最も厳しい。主な信頼性向上策は次のとおりである。

(1) 完全ダンパ巻線構造の採用

不完全ダンパ巻線構造（磁極部にダンパ巻線なし）はFTHRI機に、また完全ダンパ巻線構造（磁極部にもダンパ巻線あり）はFTHDD機に採用される。完全ダンパ巻線構造の逆相損失は、不完全ダンパ巻線構造の約40%に低減する。

(2) 保持リングとダンパ巻線間での確実な通電の確保

保持リングと回転子くさび、ダンパ巻線間の通電は接触面を通して行われるので、これらの接触面での面圧を200 kg/cm²以上とする。ダンパ巻線スロット部では、この目的のために特別な加圧片が設けられる。更に接触面には、銀溶射、銀めっきを施し、接触抵抗の低減を図る。

(3) 耐熱強度の大きい材料の使用

回転子主要材料の耐熱強度を表1に示す。

表1 回転子主要材料の耐熱強度

部 品	材 料	許 容 温 度(℃)	
		短時間	連 続
回 転 子 鉄 心	NiCrMoV 鋼	425	425
回 転 子 く さ び	ベリリウム銅	300	150
保 持 リ ン グ	非 磁 性 鋼	380	—
ダンパ巻線	銀 入 り 銅	380	200

3.3 進相運転

発電機の空隙磁束は、界磁電流によって生ずる磁束と、電機子電流によって生ずる磁束によって求まり、端子電圧にほぼ比例した値となる。ところが、鉄心端部では起磁力の空間的な位置及び磁路が空隙部とは異なるので、鉄心端部漏れ磁束は端子電圧が一定であっても運転状態によって異なり、進相運転において最も大きな値となる。

進相運転においては、空隙主磁束の漏れ分に対して固定子巻線エンドの漏れ磁束は増磁作用をする。また、鉄心端部磁束はケイ素鋼板面に直角に入るので、鉄心端部に大きな渦電流損を生ずる。以上の理由により、進相運転時には鉄心端部過熱の問題が生ずるのである。

主な信頼性向上策は次のとおりである（図4参照）。

(1) 軸方向侵入磁束の低減対策

- (a) 鉄心端部の段落し
- (b) 磁気遮へいリングの採用
- (c) 非磁性回転子保持リングの採用

(2) 発生損失の低減対策

- (a) 鉄心歯部のスリット加工
- (b) 非磁性フィンガの採用

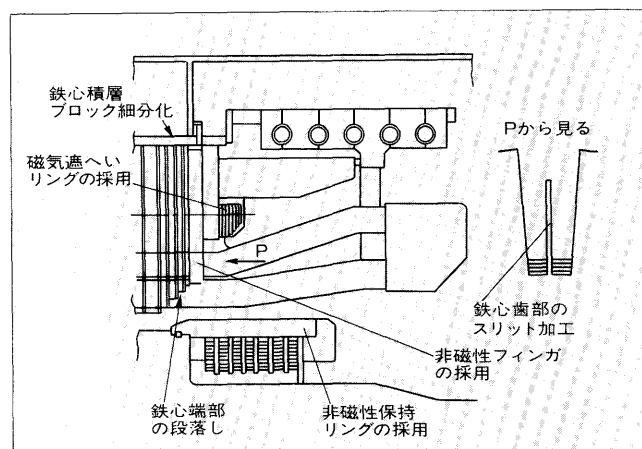
(3) 冷却向上対策

- (a) 鉄心端部における鉄心積層ブロック長の細分化

3.4 回転子サーマルアンバランス

発電機が大容量化するにつれて回転子の体積を増す必要があるが、直径は材料の強度に制約されるため、鉄心長の増加によってこれを補う必要がある。このため、回転子の鉄心長 L と直径 D との比で表される細長比 L/D は増加

図4 進相運転に対する鉄心端部の過熱防止



する傾向にある。 L/D の増加は、軸の曲がりに対する感受性を高め、温度や摩擦など拘束力の周上におけるわずかな不均一さが軸振動を発生させる可能性を高めることになるので、 L/D は7程度が限界である。したがって、 L/D の大きな機械ほどバランス調整を慎重に実施する必要があると同時に、運転状態の変化に伴って生じ得る回転子周上の温度の不均一さや熱膨張に伴う拘束の不均一さを避けるようにしなければならない。

サーマルアンバランスの原因と発生の機構、及び信頼性向上対策を表2にまとめて示す。

3.5 固定子巻線のスロット固定法

発電機のスロット内の固定子巻線には電流の2乗に比例した2倍サイクルの電磁力が作用している。発電機の容量が大きくなると、電磁力も大きくなるので、巻線の絶縁の損傷を防止するために、スロット内の巻線の振動を抑制することが重要である。

このため、電磁力の比較的小さい約60MVA以上の空気冷却機（FTLRI）と水素冷却機（FTHRI）の間接冷却方式固定子巻線にはくさびと上コイルの間にトップスプリングライナを挿入し、固定子巻線の防振を図っている。更に、電磁力の大きい直接冷却機（FTHDD、FTHDF）では、上記のトップスプリングライナに加えて、固定子コイルの側

面と歯部との間に半導電性サイドスプリングライナを設けて、防振効果を向上させるとともに、コイルと鉄心とを確実に接触させている。

固定子巻線の緩み対策として、工場製作時に初期的なじみ促進作業が行われる。巻線をスロットに挿入したのち、図5に示すごとく、仮くさびを用いて加圧ホースを固定する。巻線を加熱した状態でこのホースに圧力を掛け、所定の時間放置する。この作業により巻線のだんじみをあらかじめ促進させ、以後の永久変形を減少させることができる。

4 予防保全技術

発電機の信頼性を高めるには、製作面での対策だけではなく、発電機の健全性を監視・診断することが重要である。以下に最近開発が進められた予防保全技術について述べる。

4.1 軸振動解析装置

発電所におけるタービン・発電機軸系の振動を測定し解析するために、ミニコンピュータを搭載したコンテナ収納形の現地軸振動解析装置が開発され実用に供されている。

この現地軸振動解析装置を使用することによって、各試験段階における軸振動の評価を広い視野から即座に行うことが可能となった。

4.2 軸ねじれトルク監視装置（TSA）

運転中の軸ねじれ振動を常に監視し、あらゆる系統外乱に対する軸寿命消費を予測することは、機械を安全に運転する上で重要である。この目的のために累積軸寿命消費量の計算や分析などをオンラインで行う軸ねじれトルク監視装置（Torsional Stress Analyser：TSA）を開発した。これは図6に示すような機能・構成となっている。

アナログ部の電気トルク演算部では、発電機の電圧・電流信号から電気トルクを演算しているが、電流計測は直流分電流を正確に求めるためロゴスキーコイルを用いている。

蒸気トルク演算部では主蒸気圧力と制御弁開度、又は高圧タービン入口蒸気圧と中圧タービン入口蒸気圧によって蒸気トルクを求めている。

上記の入力に基づき、高圧・中圧・低圧タービンと発電機・励磁機の軸系のねじれ振動のアナログモデル計算を実

図5 固定子巻線のだんじみ促進処理

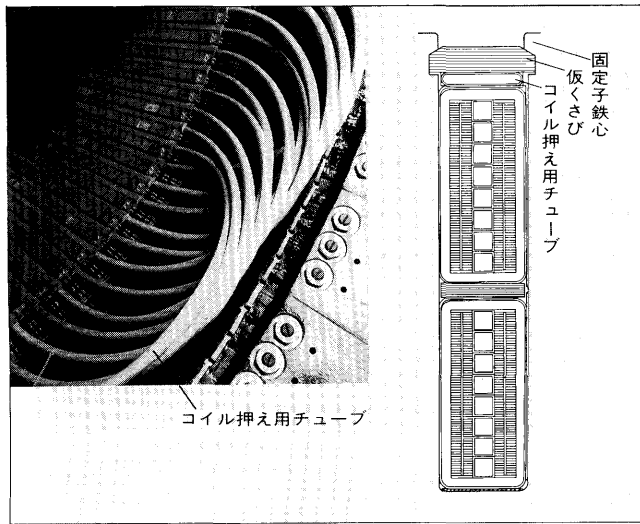
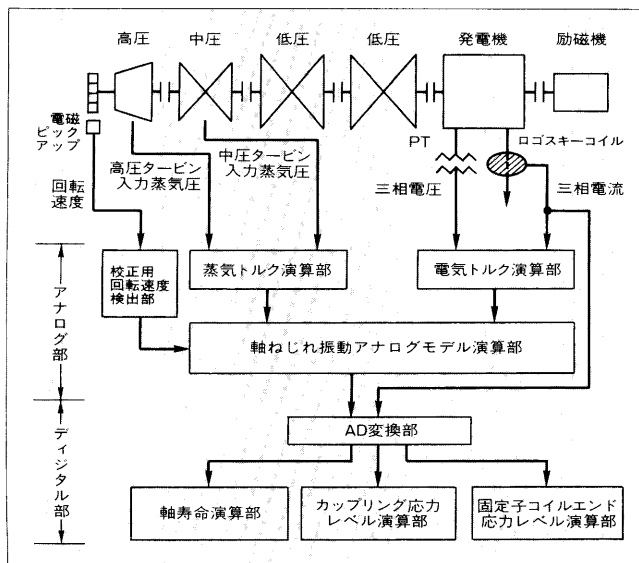


表2 サーマルアンバランスに対する信頼性向上対策

原因	熱振動発生の機能	信頼性向上策
軸材の不均一性	材料の不均一性による周上の熱膨張係数の差により周囲温度が変わると軸に曲がりを生ずる。	・製鋼、熱処理法の規定。 ・許容残留応力の規定と実測による確認。
巻線温度上昇不均一	・材料加工誤差による発生損失、冷却の不均一 ・絶縁物との組合せ異常による冷却の不均一のため軸の温度分布が周上不均一となり軸に曲がりを生ずる。	・導体寸法のゲージによる管理とロット混使用防止。 ・ガス出口加工時の治具の使用。 ・コイルエンド絶縁間隔片、層間絶縁、くさび下絶縁の移動の防止。
巻線層間短絡	巻線の層間短絡による温度上昇の不均一及び磁気吸引力のアンバランス。	・各ステップでの回転中、停止中のレーヤチェック。
巻線熱膨張拘束の不均一	巻線の熱膨張の拘束に周上不均一性があったとき、拘束力の差によって軸に曲がりを生ずる。	・導体とくさび下絶縁との間の比較的高い摩擦の確保。 ・保持リング内周絶縁でのテフロン皮膜の適用。
くさび、ダンパ巻線の拘束の不均一	くさび、ダンパ巻線の拘束に周上下均一性があったとき拘束力の差によって軸に曲がりを生ずる。	・スロットとの適切なすきまの維持と挿入力管理。

図6 軸ねじれトルク監視装置の機能・構成



行する。この時計算と実際の軸の振動の誤差を修正するため、校正用信号として、高圧タービンの軸端に設けた角速度計（電磁ピックアップ）を使用している。

更に軸ねじれトルク計算に引き続き、軸寿命などの計算を実施している。

4.3 回転子巻線レヤーモニタ

回転子巻線にレヤーショートが生じると回転子表面温度に差異を生じ、それに起因して振動が発生するいわゆる熱アンバランスを生じる可能性がある。しかし、熱アンバランスは冷却の不均一などによっても生じるので、熱アンバランスがレヤーショートによって生じたか否かを明確にするのは重要である。

レヤーモニタは回転子の磁束分布によって判定するが、回転子巻線の磁束分布を測定する方法としてはサーチコイルを図7に示すような以下の二つの方法がある。

- (1) 固定子歯部に取り付ける方法
- (2) 空隙に固定子外周から挿入する方法

発電機の三相短絡状態において、回転子巻線が正常時とレヤーショート時におけるサーチコイル誘起電圧波形を図8に示す。レヤーショートするとその箇所の起磁力が減少するので磁束分布も小さくなる。

4.4 ブラシ火花監視装置

発電機の励磁用スリップリングが荒損したり、ブラシ保持器の特性が悪化すると、その徴候としてブラシ火花が発生し、スリップリングが急速に荒損すると同時にブラシの異常摩耗が生じるようになる。そのため、ブラシ火花を連続的に監視することは予防保全上重要である。このブラシ火花を監視する方法として、ブラシ火花に伴って、励磁電圧に重畳する高調波電圧を検出する方法、又は電磁波としてのノイズを検出する方法が検討されている。励磁電圧に

図7 レヤーモニタ用サーチコイル

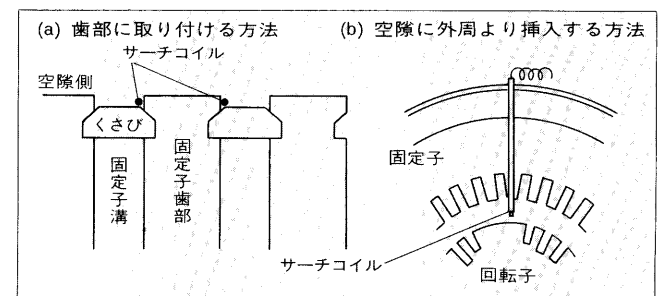
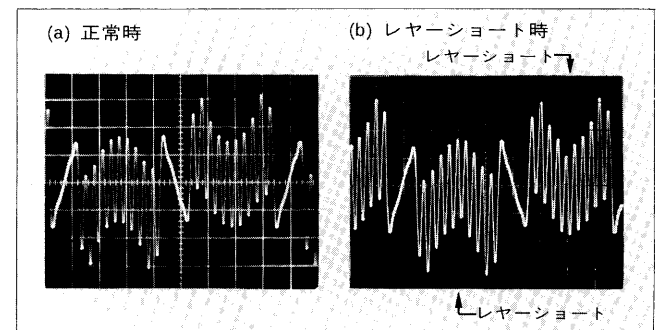


図8 レヤーモニタ用サーチコイルの誘導電圧波形(三相短絡状態)



重畳する高調波電圧を利用して、ブラシ火花を監視する装置を開発中である。

4.5 ブラシレス励磁方式の発電機界磁計測モニタ

ブラシレス励磁方式では、発電機の界磁諸量（界磁電圧、電流、接地検出）を直接計測することはできないが、テレメータを利用して、これら諸量を非接触で測定する装置を開発した。

この装置は界磁諸量の大きさに応じた信号をFM搬送方式により固定部に伝送するものである。界磁電圧は発電機巻線間に分圧抵抗を設けて計測し、界磁電流は界磁回路に抵抗・温度係数の低いマンガニンをシャントとして挿入し、その電圧降下によって計測している。また、接地検出は界磁巻線と軸との間に直流電圧を与え、その電流を計測することによって達成した。これらに供給する電源は回転トランスを用いて固定側から与えた。

なお、回転整流装置のダイオード保護用ヒューズの故障検出として、光センサを用いる方法を開発した。

5 あとがき

以上、最近の大容量タービン発電機の技術進歩について、信頼性向上策及び予防保全技術を中心にして述べた。本稿が関係者各位の御参考になれば幸いである。

参考文献

- (1) Zwignagl, W.: Zur Revision von Generatoren, Elektrizitätswirtschaft, Jg. 79, Heft18, p.656-659 (1980)



＊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。