特集 火力発電新技術

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

# 大容量高性能タービン発電機

Large Capacity High Performance Turbine Generators

タービン発電機の大容量化の傾向は頭打ちにあるが、よりいっそうの効率向 上及び中間負荷火力運用を代表とする多様な運用形態に対応する耐力と信頼性 の向上という、質的な面での技術の向上が要求されている。

効率向上に関しては、種々の効率改善技術を適用することによって600MW以 上の大容量機では99.0%の高い効率を得る見通しを得た。また、中間負荷火力 用として設計された大容量発電機も順調に稼動しており、これらの技術が実証 されつつある。励磁装置もPSSを付加した超速応励磁方式の採用により、安全性 及び信頼性の向上がなされている。これらの技術は既設機にも適用が可能であ り、既設機の効率向上及び耐力と運用性の向上に貢献するものである。

田中幸二*	Kôji Tanaka
渡辺 孝*	Takashi Watanabe
大井柾雄*	Masao Ooi
万城 宝**	Minoru Baniô

#### 言 1 緒

火力単機容量の大容量化は頭打ちの傾向にあり、量的拡大 よりも,むしろ高効率,運用性の向上を目的とする質的な向 上が要求されている。

主要高効率化技術 表丨 発電機の効率を向上するためには、発電 機損失を構成する各々の損失に対してきめ細かい改善が必要である。

発電機は電磁気現象を利用して、機械エネルギーを電気エ ネルギーに変換する。このエネルギー変換形態は、他のエネ ルギー変換に比べてもともと損失が小さいので、わずかな効 率向上もかなりの損失低減を必要とするため, 効率向上は容 易ではない。しかし、プラント全体の効率向上に対応して、 発電機に関しても高効率化の新技術により、非常に高いレベ ルの効率を実現することが可能となってきた。

一方、火力機の中間負荷火力運用の対象は大容量機まで拡 大される傾向にあり、中間負荷運用耐力はますます重要とな っている。また、信頼性をより向上するための材料、検査技 術に関してもたゆまぬ努力が続けられている。本論文ではそ の代表例として、耐食性のリティニングリング材料、リティ ニングリングの焼ばめ部の欠陥識別を可能にした新しい超音 波探傷法、及びシャフトのウェッジはめあい部でのフレッテ ィング疲労の研究について紹介する。

励磁装置に関しても、送電系統の大容量・長距離送電化に 伴い、信頼性の向上及び電力系統安定度向上が従来にも増し て必要となってきている。このニーズに対する新技術と今後 の技術動向について触れる。

#### 高効率化技術 2

発電機の損失は機械損(風損及び摩擦損),鉄損,銅損及び 果が落ちないようにしている。 漂遊負荷損に分けられる。もともと大容量発電機の損失は出 固定子コアは表2に示すように薄い電磁鋼板を積み重ねて 力の1%強程度とかなり小さいので,発電機の効率を向上す 構成されているが,数十ミリメートルの厚みのパケットとパ るためには上述の各損失に対するきめ細かい改善の積重ねが ケットの間にダクトを設けており、このダクトを通過する水 素ガスによって冷却されている。コアの冷却効果を高めるた 必要である。主要な高効率化技術について表1にまとめると

損失の種類		対象部品	高効率化技術	
機 械	風損	ファン	• リデューストフロー(ガス仕切りバ ッフル付き)	
損	摩擦損	· ベアリング	• ショートベアリング	
鉄	損	固定子コア	<ul> <li>コア材質グレードアップ</li> <li>中間ダクトの非磁性化</li> </ul>	
直	流 銅 損	固定子コイル	<ul> <li>・混合素線異断面コイル</li> <li>・断面積増大</li> </ul>	
	遊損	固定子コイル	• 混合素線異断面コイル	
漂		固定子端部	<ul> <li>● スリット付きエンドダクト</li> <li>● 電磁界解析による最適形状</li> </ul>	

ともに、以下にその詳細を示す。

(1) 風損及び摩擦損

風損を低減するためには,通風経路の通風抵抗を減少する きめ細かい改善とともに、ファンを小形化して通風量を減少 するリデューストフローが非常に効果的である。この場合, 同一構造では通風量の減少によって冷却能力が低下するので, 固定子コアの冷却を工夫して,通風量の減少によって冷却効

\* 日立製作所日立工場 \*\* 日立製作所大みか工場

めには、ダクト数を増加し、それに反比例してダクトの幅を 狭くすることが有効である。600~700MWクラスの発電機を 例にとると、従来は幅が10mmのダクトを採用していたが、リ デューストフローの場合、ダクトの幅を8mmとしてダクトの 数を増加する。したがって、1パケットの厚みは20%低減す るので,パケット中央部の最高温度位置での温度上昇を抑え ることが可能となり風量を20%以上低減できる。

このように、ショートピッチダクトの採用は冷却特性を大 幅に向上するので、逆に少ない通風量で効果的な冷却を可能 にする。したがって、本方式の採用により表2に示すように ファンの高さを70%にして通風量を20%低減できるので、フ アン水頭の低下と併せて通風損失を30%減少することができ る。

摩擦損の大部分は軸受部の潤滑による損失である。軸受損 失は,面圧に依存せずに,油膜を形成している寸法によって 決まるので、軸受損失の低減のためには面圧を比較的高くす ることによって軸受長を短くするショートベアリングが採用 される。

(2) 鉄 損

2極及び4極の極数の少ない機械では、固定子コアバック 部を通過する磁束が多く,かつコアとしての体積も多いので

コアバックの磁束の流れ(円周方向)の方向に磁区がそろって いる方向性ケイ素鋼板を使うことが有効であることは周知の 事実である。

更に損失低減するためには、材料自身の損失特性を良くし なければならない。材料のグレードアップによって、更に、 鉄損を低減することが可能である。また、パケットとパケッ トの間の通風ダクトを構成するために磁性のI形形鋼を使用し ているが、この部分での損失も無視できない。このダクト材 を非磁性化することが鉄損の低減に有効である。

(3) 銅損·漂遊負荷損

固定子コイルに発生する渦電流損はコイルの素線の高さの 二乗に比例するので、冷却用の通水孔を持っているために素 線の高さが高くならざるを得ない中空素線に対して、通水孔 のない中実素線のほうが損失を低減できる。更に、上コイル と底コイルの温度をバランスさせるために、上底コイルを異 断面とした異断面混合素線コイルが、漂遊損失及び直流銅損 低減のために最近の大容量機に採用されている。更に、損失 に重点を置いた素線寸法と構成の最適設計あるいはコイル断 面積の増大で損失を低減することが可能である。従来は、コ イル内で発生する漂遊損失算定のためのコイル端部の漏れ磁 束あるいはスロット径方向の入射磁束の考慮が十分でなかっ

表2 リデューストフローによる風損低減効果 ショートピッチ ダクトの採用によって冷却性能が向上するので、ファンを小形化して通 風量の20%低減,通風損失の30%低減が可能である。

たが, FEM (Finite Element Method:有限要素法)によるコ イル端部の磁束分布の解析精度向上などによって、前記の最 適設計が可能となった<sup>1)</sup>。

FEMによる固定子コア端部の磁束分布及び損失分布の計算 の結果、図1に示すようにティース部を押さえているエンド



ダクトでの損失が比較的大きいということが明らかになった。 したがって、この部分にスリットを設けることが損失低減及 び進相運転時のコア端部の温度上昇低減に有効であり、この 技術を適用した最新の670MVA機ではティース部の温度上昇 を従来機に比べて20%以上低減することができた。

以上の各損失に対する高効率化技術を適用すれば,600~700 MW機に対して99.0%という非常に高い効率を実現できる見 通しを得た。また、これらの技術は既設機にも適用可能であ る。図2にすべて中空素線で構成された等断面コイルを持つ 350MVA水冷機にこれらの高効率化技術を適用した試算例を 示すが、発電機の効率を0.13%向上することが可能である。 なお精密点検時を利用して、これらの高効率化技術を部分的 に適用して性能を向上した例もある。

# 3 中間負荷火力運用に関する技術

起動・停止の頻度の高い,中間負荷火力運用の対象となる 発電機の容量も増大する傾向にある。本格的大容量DSS (Daily Start and Stop)機として設計された関西電力株式会 社相生発電所向け375MW機は,昭和58年に,また,関西電力 株式会社御坊発電所向け600MW機は昭和59年に運開し,共に 順調に稼動している。更に,九州電力株式会社松浦発電所向 け700MW機もDSS運用を考慮して設計製作されて現在据付 け中である。 した最適形状の極間接続線を採用している。実際に高頻度の 起動・停止が行われている前述の375MW機及び600MW機の 定期点検では、極間接続線の変形、異常は全くみられず良好 である。

また,高頻度の起動・停止による危険速度通過回数の増大 及び負荷変化回数の増大に伴い,軸振動の低減も必す(須)で ある。特に,60Hz大容量機は軸系のフレキシビリティが増大 し,定格回転で三次モードとなるために振動感度が増大し, また,熱曲がりを生じる熱的な不平衡に敏感になる。

したがって,第一に軸を剛に設計することが重要である。 図4に700MW・3,600rpm機の軸胴長と軸胴径の比をパラメー タとして,振動感度を計算した結果を示す。700MW機は振動 感度を下げるために,600MW機と同一胴長で軸胴径を大きく して設計されている。これは軸胴径を600MW機と同一にして 軸長を長くした場合に比べて,振動感度を約40%に低減でき るので運転性の面で優れている。

また,熱回路の不均一あるいは通風回路の不均一による微小な熱不平衡に対して敏感となり,負荷ストロークが増大す るので,機械的なバランスだけでなく,熱的なバランスをと ることが重要である。日立製作所では,工場内に現地負荷相 当の温度状態を実現できる大電流通電バランス装置<sup>2)</sup>を持って おり,ウェッジの通風量の調整によって熱的バランスをとる ことが可能であり,負荷ストロークの低減に成果を挙げてい る。

DSS機としての考慮点を図3に示す。コイル関係について は,熱サイクルを受ける絶縁物のヒートサイクル特性が良く なければならない。また,ガス仕切りバッフル及び片道流通 水方式により温度上昇自身を低減し,熱伸びを逃がすように している。界磁コイル部でひずみが集中する極間接続線に関 しては,種々の形状から解析及びモデル試験を実施して選定



# 4 材料の進歩と高信頼性新技術

#### 4.1 タービン発電機用材料の進歩

ここでは発電機用材料として代表的な回転子コイル端部を 遠心力に対して保持しているリティニングリング材について 述べる。

従来,リティニングリング材は,非磁性オーステナイト鋼 である18Mn-5Cr鋼が広く使用されてきた。しかし,1970年代 にヨーロッパでリティニングリングの破壊事故が発生し,こ の材料はSCC(応力腐食割れ)感受性が高く,ある環境におか れるとSCCを起こしやすいということが明らかになった。

発電機が運転中であれば、水素雰囲気中で問題はないが、 製作時及び定期点検でロータを抜き出す場合には、リティニ ングリング表面が結露するとSCCのポテンシャルがある。し たがって、保管時には結露させない工夫をしたり、定期的な 超音波探傷検査あるいは染色浸透探傷検査が行われてきた。

しかし、基本的にはSCC感受性の低い耐食性リティニング リングの出現が望まれ、18Mn-18Cr新材料が開発された。従 来の18Mn-5Crと新材料である18Mn-18Crの成分の比較を **表3**に示す。18Mn-5Crの場合、Cが0.5%程度含まれているの で溶体化処理後、結晶粒の粒界にクロム炭化物が析出する。 したがって、境界の近傍はCr濃度が低くなり、この部分が選 択的に腐食されてSCCを発生させる。そこでこの欠点を克服 するために開発された18Mn-18Cr材は同表に示す成分上の特 徴がある。 18Mn-5Crと18Mn-18Crの各々の試験片に応力を負荷して、 塩水噴霧の状態で比較試験を実施した結果を図5に示すが、

57

#### 350MVA水冷機の例

図2 既設火力機への高効率化技術適用効果 350MVA水冷機に 高効率化技術を適用することによって,発電機効率を0.13%向上するこ とが可能である。



注:略語説明 UT(超音波探傷), MT(磁粉探傷), DSS(Daily Start and Stop), T-G(タービン発電機), JOP(ジャッキングオイルポンプ)

図3 中間負荷火力運用機の技術的特徴 中間負荷火力運用機は、各コンポーネントに対して耐ヒートサイクル及び疲労強度を向上する技術が 適用されている。



図 4 700MW機の軸剛性と振動感度 容量増大に伴い,軸のフレキシビリティが増して振動感度が増大するので,700MW機は600MW機と軸胴 長を同一,軸胴径を増大して軸の剛性をアップして振動感度を下げている。

18Mn-18Crは耐SCC特性が非常に優れている。 既にヨーロッパ及びアメリカでは本鋼種が採用されている。
18Mn-5Cr鋼の場合でも、保管時に留意すれば問題のある材料ではないとはいえ、本質的に耐SCC性に優れた新材料の登場とその実機採用実績も出てきており、今後国内でも採用が進

58

む気運にある。 4.2 検査技術の進歩

リティニングリングは作用応力の高い回転部品で,前述の ようにSCCのポテンシャルもあるので回転子を抜く定期点検 時,回転子にリティニングリングが装着された状態で外周面

大容量高性能タービン発電機 949

表3 リティニングリング材料の成分比較 18Mn-18Crの特徴は、 (1)クロム炭化物の析出を抑えるためにC量を減少する。(2)C量の減少に よる強度の低下を同じ侵入形原子のNで補う。(3)Nの添加を容易にして 耐食性を増すためにCr量を増大している。

材質	С	Mn	Р	S	Si	Cr	Ν	備考
18Mn-5Cr	0.4~0.6	16.5~18.5	≦0.07	≦0.015	≦1.0	3.5~5.0	-	*
18Mn-18Cr	0.1	18.36	0.015	0.003	0.33	17.57	0.56	* *

注:\* 発注仕様, \*\* 実材料分析結果

から超音波探傷試験を実施して健全性を確認している。図6 に示すように、リティニングリングがシャフトに焼ばめられ ている部分は、シャフト側にスロットが設けられており、ス ロットで隔てられたティースの上に焼ばめられている。この ような焼ばめコーナー部では超音波の横波が反射して擬似エ コーを発生し、欠陥による反射エコーとの識別を困難にする という問題点があった(図7の従来方式参照)。

そこでこの問題を解決するために鉄の媒質をばね一質点系

![](_page_4_Figure_6.jpeg)

図6 リティニングリング焼ばめ部 リティニングリングはロータ シャフトのティース部に焼ばめられており、焼ばめコーナー部では超音 波探傷時,擬似エコーが発生し、この部分での欠陥検出を難しくしている。

![](_page_4_Figure_8.jpeg)

注:略語説明 Y.S.(降伏点)

![](_page_4_Picture_10.jpeg)

に置き替えて弾性波の挙動を解析するシミュレーションを実 施した3)。その結果、欠陥が存在すると入射した横波が欠陥部 及びその近傍の底面で反射し、モード変換され縦波を生じて おり、これを利用すれば効果のあることが判明した。この現 象を利用して、図7に示すような新方式の超音波探傷法を開 発した。この探傷法の特徴は欠陥部での横波から縦波へのモ ード変換を利用して、横波送波、縦波受波の2探傷子法によ り縦波をとらえて焼ばめエコーとの識別を行うものである。 本方式により、超音波探傷が難しい部分がなくなり、欠陥の 早期検出に大きく貢献するものと思われる。

#### 4.3 シャフトのフレッティング疲労に関する研究

1970年代後半にヨーロッパで発電機シャフトティース部の 鉄製ウェッジの継目部にフレッティング疲労によるクラック が発生したことが報告され、この現象が注目されるようにな ってきた。この現象のメカニズムは図8のように考えられる。 ウェッジはコイルの遠心力によりシャフトに強く押し付けら れている。一方、シャフトは自重によるたわみのために伸縮 するが、鉄製ウェッジは剛性が高く、この力に完全に追従し た形で変形しないのでウェッジの軸方向端面とシャフトティ ース間には相対滑りを生じる。クラックの原因は、このよう な微小振幅で相対的に滑るという機械的な作用(フレッティン グ現象)を伴う位置での疲労(フレッティング疲労)と言われて いる。

応力腐食割れ耐力試験結果 塩水噴霧中で試験した結果,18 义 5 Mn-5Cr 材は500時間で破断したのに対して、18Mn-18Cr 材は3,000時間 経過しても割れが発生せず、耐SCC(応力腐食割れ)性が非常に優れている。

このような事故にかんがみ、精密点検を利用して鉄ウェッ ジの継目部のシャフトティース接触面の磁粉探傷試験を実施 するとともにウェッジとシャフトの接触境界面に作用する応 力の解析,及び実験による裏付けを行ってきた。非線形接触 問題解析プログラムで解析した結果では、ウェッジとシャフ トの接触端近傍で非常に大きな応力変動を生じていることが

59

![](_page_5_Figure_1.jpeg)

	受信:縦波		

図7 リティニングリング焼ばめ部の超音波探傷法の比較 横波送波・縦波受波の新探傷法により、欠陥部の識別を可能にした。

![](_page_5_Figure_4.jpeg)

判明した。また**図9**に示すように、実験結果では、フレッテ イングが作用するとその疲労強度は平滑材の<u>1</u>3に低下するこ と、更に平均応力が作用するとフレッティングの疲労限が大 幅に低下することが明らかになった<sup>4)</sup>。シャフトの場合、この 平均応力を発生する要因として、スロット加工時の表面残留 応力が考えられるので、クラックの発生には表面残留応力が 大きく寄与しているものと推定される。

# 5 励磁装置

### (1) 超速応励磁装置

超速応励磁装置とは、過渡安定度向上のためその応答性が 数十ミリ秒以下で、かつ励磁系頂上電圧が高く、更に定態安 定度を向上させるためにPSS(電力系統安定化装置)を付加し た励磁装置を言う。実際の主回路構成は、図10に示す発電機 に直結したEX-TR(励磁変圧器)からサイリスタに電源を供給 する分巻自励方式のサイリスタ励磁装置が、回転励磁機を必 要としないので安定度向上効果、経済性及び保守性に優れて いる。

応答性の速い励磁装置は、過渡安定度の向上には有効であ

自重によるシャフトのたわみ状態

60

図8 ウェッジとシャフト相対変位のメカニズム 鉄ウェッジの 剛性が高いため、シャフト自重によるシャフトの伸縮に完全に追従しないので、 (A)、 (C)のケースで微小滑り変位 δを生じる。 る反面,応答性が良いためにかえって,送電線回路変更など で生じる小外乱を持続又は振動発散する一種の負制動現象を 発生しやすくなる。PSSは系統の動揺信号を検出して,この信 号を適正にゲイン・位相調整した後,自動電圧調整器の補助 信号として与えることで定態安定度を積極的に改善する装置 である。図10にPSSの効果を示す。

大容量高性能タービン発電機 951

![](_page_6_Figure_1.jpeg)

![](_page_6_Picture_2.jpeg)

![](_page_6_Figure_3.jpeg)

図9 フレッティング疲労試験結果 平均応力が作用すると、フレッティングによる疲労強度は大幅に低下する。

![](_page_6_Figure_5.jpeg)

PT(計器用変成器), Vref(90R)(電圧設定器), PSS(電力系統安定化装置)
CT(計器用変流器), Iref(70R)(界磁電流設定器), IPB(相分離母線)
EXTR(励磁用変圧器), AMP(増幅器), APPS(自動パルス移相器)
FS(41)(界磁遮断器), THY(サイリスタ), GEN(発電機)

61

(a) EXTR+サイリスタ励磁方式

(b) PSSの効果

図10 超速応励磁方式とPSSの効果 2回線運用時に1回線を開放したことによって生じる電力動揺の減衰特性は、PSSの使用により大幅に向上している。

![](_page_7_Figure_1.jpeg)

注:略語説明など MAG1(初段磁気増幅器) MAG2(後段磁気増幅器) HTD (Hitachi Tuning Dunama)

HTD (Hitachi Tuning Dynamo:回転増幅器) IM (誘導電動機)

注:略語説明など

所内電源

FR (Field Rehostat:界磁調整器) AVR (自動電圧調整器) []]] 改造範囲

PMG (Permanent Magnetic Generator:永久磁石発電機) DC-EX(直流励磁機) [\_\_\_] 改造範囲

(a) DC-EX+HTD AVR方式(更新前)

(b) DC-EX+サイリスタAVR方式(更新後)

図11 既設励磁装置の更新 従来の時間遅れの大きいMAG1,2(磁気増幅器),HTD(回転増幅器)に対してTHY(サイリスタ)などの電子式ハード を用いて高速化することにより、PSSを設置して安定度,保守性及び信頼性の向上が可能である。

### (2) 既設励磁装置の更新

従来の励磁方式は図11のように制御機器に時間遅れの大き いMAG1,2(磁気増幅器),HTD(回転増幅器)を用いている ので,応答性が遅くPSSを設置しても定態安定度の向上は望め ない。そこで制御機器に同図に示すように,IC又はサイリス タなどの時間遅れのない電子式ハードを用いて高速化し,こ れにPSSを設置することによって,定態安定度の向上のほか, 保守性,信頼性の向上をも実現できる。このため,既設励磁 装置更新での標準として広く採用されてきている。同図は直 流励磁機の場合について示したものであるが,交流励磁機に ついても同様である。

(3) 今後の励磁装置

62

超速応励磁装置は励磁装置として理想的なものと考えられ るが、今後も信頼性、保守性及び系統安定度のよりいっそう の向上が期待されている。このため、現在のアナログ方式か ら高速マイクロプロセッサを制御の中枢に用いたディジタル

## 6 結 言

以上,タービン発電機の高効率化,中間負荷火力運用,材 料,検査及び励磁装置関係の新技術について述べた。これら の技術は新設機だけでなく既設機にも広く適用され,性能向 上及び信頼性向上に寄与するものである。更に,最近注目を 浴びつつあるAI(Artifitial Intelligencel:人工知能)を駆使し たエキスパートシステムによる運用性と信頼性の向上技術も 実用に向けて鋭意努力が継続されており,今後ともタービン 発電機の高性能化,高信頼性化のための新技術の開発に全力 を尽くす考えである。これからも関係各位の御指導,御助言 をお願いする次第である。

## 参考文献

 

 斉藤,外:タービン発電機固定子コイルの素線電流分布の一解 析,電気学会論文誌,Vol.105-B,No.3,249~256(昭60-3)

 渡辺,外:大容量タービン発電機の軸振動に関する最近の進 歩,日立評論,59,12,977~982(昭52-12)

 岡田,外:角部の欠陥識別に関する超音波反射シミュレーショ ン,日本非破壊検査協会第2分科会,資料No.21100, p.23~ 28(昭61-5)

 服部,外:フレッチング疲労の破壊力学的解析,機械学会論文 誌,53-492(昭62-8)

万式に移行する機連にある。	ディジタル万式を採用すると多
重化による高性能化のほか,	多変数フィードバックによる適
応制御の採用による広域安定	E化装置への機能拡張,内蔵シミ
ュレータによる自動電圧調整	を器単独による動特性チェック機
能の追加など,保守性の向上	こが近い将来実現可能になると思
われる。	