

世界最大タンDEM 1,000 MW タービン発電機の完成

Successful Manufacturing of World's Largest Tandem 1,000 MW Turbine Generator

伊藤 裕道
ITO Hiromichi

大高 徹
OTAKA Toru

宮池 潔
MIYAIKE Kiyoshi

電源立地点の最大限の活用，スペース効率の向上，更には石油代替資源である石炭火力の経済性追求から，わが国では再び大容量火力機が検討されている。このような状況のなかで，中部電力(株)碧南火力発電所向けの世界最大2極，60 Hz，タンDEM型1,000 MWタービン発電機が完成した。1,000 MW第1号機は2001年11月の運転開始へ向け，現在，据付け，試運転・調整中である。

この発電機の設計においては，高信頼性，高性能と同時に運転性，保守性を尊重した。また，最新技術をバランスよく組み合わせ高効率・小型・軽量化を実現し，最大容量機として十分な安全裕度を確保するため，高強度の軸材料，エンドリング材料を開発し採用した。

Attention is being focused on larger thermal power units in the quest for maximal utilization of power station sites and economy of coal-fired thermal units. We have successfully manufactured the world's largest tandem, 2-pole, 60 Hz, 1,000 MW turbine generator and shipped it to the Hekinan Thermal Power Station of Chubu Electric Power Co., Inc. The first 1,000 MW machine is under installation for commissioning in 2001.

In the basic design stage, special attention was paid to enhanced operability and maintainability as well as reliability and performance. The combination of new design technologies has achieved both weight reduction and high efficiency. To ensure a sufficient safety margin, newly developed shaft forging and retaining rings were applied.

1 まえがき

1910年代に国内最初の本格的な電力用タービン発電機が製作されて以来，タービン発電機の単機容量は材料，設計などの技術革新に支えられ，大容量化と高性能化が進められてきた。70年代に700 MW機が製作されて以降，大容量原子力機の台頭や，火力機の負荷調整機能分担などの理由から，火力機の大容量化は頭打ちとなった。

しかしながら，近年減少しつつある電源立地点の最大限の活用，また，石油代替資源である石炭火力の経済性追求などの要求から，わが国では再び大容量火力機が検討される機運にある。

当社は，このような情勢に対応するため，1,000 MW級タンDEMコンパウンド機，1,400 MW級クロスコンパウンド機の開発を推進してきた。このほど，中部電力(株)碧南火力発電所4号機向けタンDEM型1,000 MW(1,120 MVA)タービン発電機が完成し，良好な工場試験結果を得て出荷された。現在，2001年11月の運転開始に向け建設中である。この発電機は，タンDEM型としては，これまでのわが国最大700 MW(800 MVA)機の1.4倍の容量で，世界でも2極60 Hz機として最大容量機となる。

ここでは，タンDEM型1,000 MWタービン発電機開発にあたっての基本方針，基本設計及び技術課題とその対応技術，並びに工場性能試験結果について述べる(図1)。



図1 1,000 MWタービン発電機の構造 高速で回転する回転子と，大電流高電圧を出力する固定子から成っている。

Structure of 1,000 MW turbine generator

2 基本方針

開発にあたっては，大容量水冷却タービン発電機の豊富な製作・運転実績を反映した。特に，15台運転中の700 MW機において実証された技術を尊重し，十分検証された基本技術をバランスよく組み合わせ，1,000 MW機として最適設計とした。回転子や軸受のように大型化し，実績を超えるものについては，先行試作による信頼性確認を実施した。

また，基本設計段階において，運転性，保守性を尊重し

ながら、高効率と建設コストとスペース削減のための徹底したコンパクト化を目指した。

3 基本設計

1,000 MW 発電機の定格を、700 MW 機と比較して表 1 に示す。容量は 1,120 MVA で 700 MW (800 MVA) 機の 1.4 倍であり、電圧は 700 MW 機と同じ実績最大の 25 kV である。このため、電流は 700 MW 機の 1.4 倍になる。機内水素ガス圧力は 700 MW 機より増加させ、520 kPa とした。

表 1 . 発電機定格
Generator ratings

項目	1,000 MW 機	700 MW 機
容量 (MVA)	1,120	800
電圧 (kV)	25	25
電流 (A)	25,866	18,475
回転数 (min ⁻¹)	3,600	3,600
周波数 (Hz)	60	60
水素ガス圧力 (kPa)	520	410
力率	0.9	0.9

一般に発電機の容量は次式で表される。

$$\text{発電機容量} (P) = K \times D_i^2 \times L \times n \quad (1)$$

ここで、 K は出力係数、 D_i 及び L は固定子鉄心の内径と長さ、 n は回転数を示す。1,000 MW 機と 700 MW 機の式 (1) の各諸量を比較して表 2 に示す。

表 2 . 出力係数、体格の比較
Design parameters for 1,000 MW unit

発電機定格	容量	K	$D_i^2 L$	D_i	L
700 MW (800 MVA)	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0
1,000 MW (1,120 MVA)	1.4	1.16	1.21	1.08	1.03

出力係数 (エネルギー密度) は単位体積当たりの容量であり、冷却水素ガス圧力上昇により増加することができる。1,000 MW 機では、水素ガス圧力を 520 kPa とし、出力係数を 700 MW 機より 1.16 倍大きい値を選定し、1.4 倍の容量増加に対して体格の増加を 1.21 倍に抑えた。

固定子鉄心内径 (回転子外径) と鉄心長は、回転子設計のもっとも重要なポイントである。回転子外径 (D) を増加する設計 (L/D が小) では、遠心力の増加に伴い高強度の回転子材料が必要となる。また、鉄心長を増加する設計 (L/D が大) では、運転性、特に振動の確認が必要になる。

1,000 MW 機は運転性を考慮し、 L/D を 700 MW 機より小さくし、 D_i を 1.08 倍、 L を 1.03 倍として、太短設計とした。回転子径の増加による遠心力の増加に対して、高強度の軸材料、エンドリング材料を開発した。

4 技術課題と適用技術

1,000 MW 機の技術課題と適用技術を表 3 に示す。大型化にかかわる技術は、回転子軸材料、エンドリング材料の高強度化、回転子振動抑制のほかに、大口径軸受、大口径シールリングが必要になる。軸受とシールリングは、実機大サイズのモデル試験で検証、確認した。一方、エネルギー密度の増加である出力係数の増加にかかわる技術課題は、固定子コイル、回転子コイルや固定子鉄心端部の温度、電磁力増加による固定子コイル端部の支持方法、電流増加による口出ブッシングの強度及び温度となる。また、水素ガス圧力の増加に対して発生応力を抑制するため、コンパクトフレーム、球形ターミナルボックスを採用した。

表 3 . 技術課題と適用技術
Major design issues and applied technologies

技術課題		適用技術
大型化	回転子軸	高強度軸材料
	エンドリング	高強度エンドリング材料
	回転子振動	L/D 小設計
	回転子断面	最大コイル面積
	軸受	23 インチ軸受
出力係数大	シールリング	2 分割タイプ
	水冷却固定子コイル	混合素線異断面コイル
	固定子コイル支持構造	エンド部スライド機構
	固定子鉄心端	磁束シャント
	固定子フレーム	コンパクトフレーム
	ターミナルボックス	球形ターミナルボックス
口出しブッシング	30 kA 級ガス冷却ブッシング	

主要な対応技術は、多目的 2,000 MVA 実機モデル、実機大固定子コイル端部モデルなどによる検証試験、各種シミュレーション解析により開発済みである。ここでは、特に重要なものについて述べる。

4.1 回転子軸材料

1,000 MW 機の回転子は外径が増加するので、十分な安全裕度を確保するために、引張強さで 1,000 MPa 級の軸材料が要求される。一般に軸材料は、高強度になればなるほど、靱性 (じんせい) は低下する傾向にあり、靱性値を確保したまま強度向上を図ることがポイントである。1,000 MW 機の回転子軸では、運転実績のある発電機軸と低圧タービン軸の材料をベースに、成分の異なる 11 種類の小形鋼塊に

よるシミュレーション試験を実施し、要求値を満足する化学成分、熱処理条件を決定した。また、材料は不純物元素の少ない高純度材を用い、精錬段階では真空脱酸法に加えて取鍋精錬を実施し、鋼質の清浄度を高めスーパークリーン化して、脆化(ぜいか)傾向のない高靱性材とした。1,000 MW機の回転子軸を図2に示す。



図2 . 回転子軸 軸材は、開発された高強度鍛造特殊鋼が使われている。

Rotor shaft

4.2 エンドリング材料

回転中に大きな遠心力を受ける回転子コイル端部を保持するエンドリングは、回転子軸とともに発電機容量限界を左右する重要な部材である。材料は、鉄心端漏れ磁束回路の形成を防ぎ、漂遊負荷損を減少させ、耐SCC(応力腐食割れ)特性に優れた18 Mn(マンガン)-18 Cr(クロム)オーステナイト非磁鋼が標準的に採用されている。1,000 MW機において十分な安全裕度確保のためには、引張強さ1,300 MPa級の強度が要求される。1,300 MPa級のエンドリング材料は素材メーカーの製作実績を超えるため、素材メーカーと共同で新材料を開発した。外径が実機大の短尺試作リングを製作し、強度向上因子である冷間加工度と窒素量の最適値を決めた。実機エンドリング材料は、造塊をESR(電気精錬)により行い不純物元素を極低化させ、偏析のない高清浄度の鋼塊とし、引張り強さも1,341 MPa以上を実現した。

4.3 水冷却固定子コイル

固定子コイルの素線構成は、縦6列で中空素線と中実素線を組み合わせた混合素線とした。中実素線を混合することで、導体断面積を確保しコイルの高さ寸法を低減できる。また、中実素線は、素線厚さが薄いことから渦電流損失が低減される。コイル温度上昇は700 MW機と同等とした。

また、上下コイルの素線寸法と構成が異なる異断面コイルを採用し、上下コイルの発生損失を均一化し、温度上昇差を抑え熱応力を低減した。コイル組立完了後の固定子を図3に示す。

コイルと口出しブッシングを接続する接続銅帯の冷却は、



図3 . 固定子コイル 固定子コイルは、中空素線と中実素線で構成され、内部に水を通して冷却する。

Stator coil

固定子コイルと冷却水経路を分離した別パス冷却方式を採用した。従来は、接続銅帯とコイルとを、シリーズに冷却していた。別パス冷却構造とすることにより、接続銅帯の冷却水量を独立して調整し冷却を強化でき、電流増加による接続銅帯の大形化を抑制した。

コイル主絶縁には、30 kV級まで使用できるF種の真空含浸エポキシ樹脂絶縁(トスタイト-I)を採用した。

4.4 固定子鉄心端部

大容量機では、電気装荷の増加により固定子鉄心端部漏れ磁束が増加し漂遊負荷損が増大するため、固定子鉄心端部の過熱防止対策が不可欠となる。1,000 MW機では、銅製シールド板、固定子鉄心端部段落とし、端部鉄心ティース部のスリットに加え、鉄心端部に磁束シャントを採用し、漏れ磁束の一部を吸収し端部の過熱を防止した。

固定子鉄心端部は複雑な構造をしているため、非線形三次元有限要素法による磁界解析を実施し、シールド板、磁束シャントの寸法、鉄心段落とし形状、スリット本数などの最適化を実施した。1,000 MW機は、電気装荷が700 MW機と比較して約10%増加するが、最適化により700 MW機(磁束シャントなし)と同等レベルまで鉄心端部入射磁束密度を低減できた。工場での温度上昇試験実測値より、もっとも温度が高くなる力率0.95進相運転時の鉄心端部温度上昇値を推定した結果、シャントなしの700 MW機より低くなった。

5 高効率と軽量・小型化

種々の高効率技術と軽量・小型化技術を組み合わせることで、単位容量当たりの質量を増加することなく定格運転で99.00%の保証効率を実現した。700 MW機と1,000 MW機の質量、寸法を表4に示す。大きな出力係数を選定すること

表4 . 発電機質量, 寸法, 効率

Generator weight, dimensions, and efficiency

項目	1,000 MW機	700 MW 初号機	700 MW 最新機
総質量 (PU)	1.05	1.0	0.86
容量/質量 (PU)	0.75	1.0	0.86
全長 (m)	17	20	16
保証効率 (定格点) (%)	99.00	98.83	99.00
製作 (年)	2000	1972	1990

PU : Per Unit

により, 1,000 MW機は700 MW機と比較し単位容量当たりの質量を75%まで低減し, 質量を初期の700 MW機とほぼ同等まで軽量化することができた。

6 工場試験結果

工場にて出荷前に, 特性試験, 損失測定, 温度上昇試験及び振動, 過速度試験を実施した。結果は仕様, 規格を満足し, 良好であった。以下に主な試験結果を述べる。

- (1) 特性 無負荷定格電圧時, 及び三相短絡定格電流時の界磁電流を確認した。設計値に対する差は2%程度でよく一致した。また, 短絡比は, 仕様の0.58以上を満足した。
- (2) 損失・効率 発電機法(電気学会 電気規格調査会標準規格)により各損失を測定し, 効率を算定した。各損失とも設計値とよく一致した。定格1,000 MW - 0.9 PF (Power Factor : 力率)時の効率は, 保証値を満足する良好な結果を得た。
- (3) コイル温度上昇 等価温度上昇試験法による試験を行い, 定格負荷時の各部温度上昇を推定した。結果は満足できる値であり, 固定子, 回転子, 固定子鉄心端とも700 MW機と同等レベルであった。
- (4) 軸振動 定格速度, 及び115%過速度試験において, 回転子振動のないことを確認し, 良好な結果を得た。

7 あとがき

1,000 MWタービン発電機は, 高信頼性, 高性能はもとよ



図4 . 据付けられたタービン発電機 中部電力(株)碧南4号機は, 2001年11月運転開始の予定である。
1,000 MW turbine generator at Hekinan Thermal Power Station

り, 運転性, 保守性を尊重し, 高性能とコンパクト化を図り, これを実現した。

軸材料, エンドリング材料の開発, 最新のシミュレーション技術, 及び大容量機の豊富な製作, 運転経験を基に, 1,000 MW機は設計・製作され, 良好な工場試験結果を得, 出荷された。据え付けられた発電機を図4に示す。

なお, このプラントは現在, 2001年11月の運転開始に向け試験調整中である。また, 2台目の1,000 MW機である碧南5号機は, 4号機の1年後に運転開始の予定である。



伊藤 裕道 ITO Hiromichi

電力システム社 京浜事業所 発電機部長。
タービン発電機の開発・設計業務に従事。
CIGRE, 電気学会会員。
Keihin Product Operations



大高 徹 OTAKA Toru

電力システム社 京浜事業所 発電機部主幹。
タービン発電機の開発・設計業務に従事。電気学会会員。
Keihin Product Operations



宮池 潔 MIYAIKE Kiyoshi

電力システム社 京浜事業所 発電機部グループ長。
タービン発電機の開発・設計業務に従事。
Keihin Product Operations