

世界最大級の二極タンデム型 60Hz 1,000MW タービン発電機

World's Largest Tandem Two-Pole 60Hz 1,000MW Turbine Generator

河合 幸彦
KAWAI Yukihiko

赤見 敏明
AKAMI Toshiaki

伊藤 裕道
ITO Hiromichi

大高 徹
OTAKA Toru

東芝では現在、中部電力(株)向けに60Hz 1,000MWタービン発電機を製作している。この開発と製作に際しては、実機と同一直径をもつ実物大の短尺発電機ロータを製作し、機械加工や組立てを含む材料・ロータ製作技術を確認し、さらに、繰返しの起動・停止を含んだ励磁・回転試験を実施し、1,000MW発電機の設計技術を検証した。

Toshiba is now manufacturing the first 60Hz 1,000MW turbine generator for Chubu Electric Power Co.,Inc. To verify the development and design, we manufactured a short-length, full-scale generator rotor necessary for use with a generator. The technologies for materials and rotor production, including machining and assembly, were verified. In addition, excitation and rotation tests that included repeated starts and stops were conducted to verify the design technologies for a 1,000MW-class generator.

1 まえがき

火力発電プラントには立地問題、地球環境との調和を考慮し、高効率・大容量化の要求が強まっている。

タービン発電機単機容量増大の歴史は、冷却技術の進歩とロータ製作限界の克服の歴史とも言える。導体直接冷却技術とロータ材料技術は単機容量増大にとってもっとも重要な技術の一つであり、出力係数の増加、高電圧および大電流にかかわる技術課題の解決が容量増加を実現している。また、大容量機においては、発電機効率は定格負荷点においてすでに98%を超えているが、さらなる効率向上の要求にこたえて、最近では最新技術により機器の寸法・重量を増加することなく99.00%の保証効率を実現している。

このたび、中部電力(株)では、このような点を考慮した世界最大級の二極タンデムコンパウンド60Hz 1,000MWタービン発電機を採用し、東芝はその製作を担当した。

ここでは、設計・製作時に直面した技術的課題と、機器効率を向上させるための最新技術について述べる。

2 大容量発電機に対する技術的挑戦

巻線の直接冷却技術とロータ軸材特性は、単機容量増加にとってもっとも重要な技術である。容量増加に寄与した他の技術としては、出力係数の向上、高電圧化、そして大電流化である。以下に、二極タンデム型60Hz 1,000MW発電機の技術的課題と、その解決策について述べる。

2.1 発電機の設計の概要

発電機単機容量の増大は、材料と冷却技術の進歩にその

多くを負っている。大容量二極発電機では、ロータ巻線は、直接水素ガスで冷却され、ステータ巻線は純水により冷却される。大容量発電機の設計は、水素ガス圧力の増加、ステータ巻線の冷却水通水方式の改善によって可能となった。

タービン発電機の容量(P)は、以下の式で記述される。

$$P = K \cdot D_i^2 \cdot L \cdot n$$
$$K \propto B \cdot A$$

ここで K は出力係数、 B はエアギャップにおける磁束密度、 A は電気装荷、 D_i と L はそれぞれステータ鉄心内径とステータ鉄心長(ロータ鉄心長)、 n は回転速度を表す。

出力係数 K は単位体積当たりの出力であるが、 B と A の積にほぼ比例する。その値は、巻線設計の結果決まる鉄心スロット幅と、鉄心の磁束密度に影響するティース^(注1)の幅の間のバランスを考慮して選定される。 B は、鉄心の主磁束密度から決定され、 A は主にステータ巻線と鉄心端の温度上昇によって決定される。 K は冷却能力に密接に関連し、絶対水素ガス圧力比の0.8乗にほぼ比例して増加する。水素ガス圧力は700MWの発電機では410kPagであるが、1,000MW発電機は520kPagにまで増加させている。図1に、発電機容量と出力係数との関係を、水素ガス圧力をパラメータとして表す。

出力係数 K が決まると、次はステータ鉄心の内径と、発電機容量に応じた鉄心の長さを決定することである。特に、大容量発電機のこれら寸法を決める際には、ロータ軸材とロータ巻線エンド部を保持するエンドリング材の製作限界を見極め、運転性を十分考慮した検討を行うことが必要で

(注1) 鉄心の円周方向に配置されている固定子巻線と固定子巻線の間の鉄心部分。

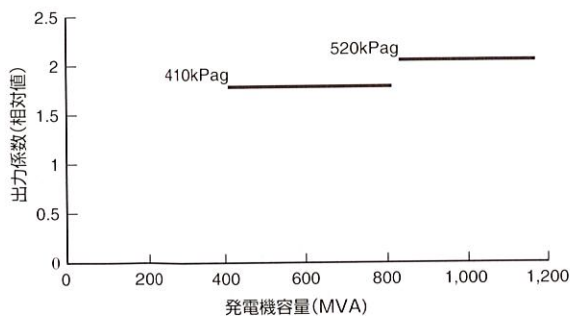


図1. 発電機出力係数の推移 発電機容量増加とともに水素ガス圧を上げ出力係数を増加させている。
Variation of output coefficient

ある。ロータの外径 (D) を増加させる、すなわちステータ鉄心長と内径の比 (L/D) が小さい設計では、より強度の高い軸材とエンドリング材が必要となる。鉄心長を増加させる、すなわち L/D が大きい設計では、振動に対する十分な確認が必要となる。実際には、強度、温度上昇、磁束密度、そして運転性について総合的な検討が加えられ、こうした要因が十分調和するようにロータの最適外径と断面の詳細を決定する。

2.2 発電機大容量化の技術

発電機容量を増大させるために必要となる主要な技術のなかでも、タンデム型1,000MW発電機に特に重要なものは以下のとおりである。

2.2.1 ステータ巻線の主絶縁 1,000MW発電機の端子電圧は25kVとし、ステータ巻線主絶縁には、最高適用電圧30kVまで適用可能なF種真空含浸、エポキシ樹脂絶縁システムを使用した。高電圧は、巻線最端部でコロナ放電を抑えることと、主絶縁を確実にすることが、特に重要であり、巻線端部の電位傾度を最適化するために絶縁表面に非線形性の抵抗特性をもつSiC(半導電性)テープが巻かれる。これらの技術はすでに実機に適用されており、信頼性が確認されている。

2.2.2 水冷却ステータ巻線 ステータ巻線は、巻線の高さを減らし発生損失を抑えるために中空線と中実線の混合素線により構成されている。上コイルと下コイルはおの異なる素線寸法と配列をもつ、異断面の巻線が使われ、損失を均一化させ、温度差を最小化し、上コイルと下コイル間の熱応力を減少させる。

図2に、1,000MW発電機のステータ巻線の断面図を700MW発電機のものと比較して示す。1,000MW機は、電流の増加に伴い巻線は横6列配列とした。

大容量発電機においては、上コイルと下コイルの上下コイル接続用に、ソリッドコネクショが採用され、直接冷却、高い剛性、および部品点数の減少により、冷却能力と信頼性が著しく向上した。

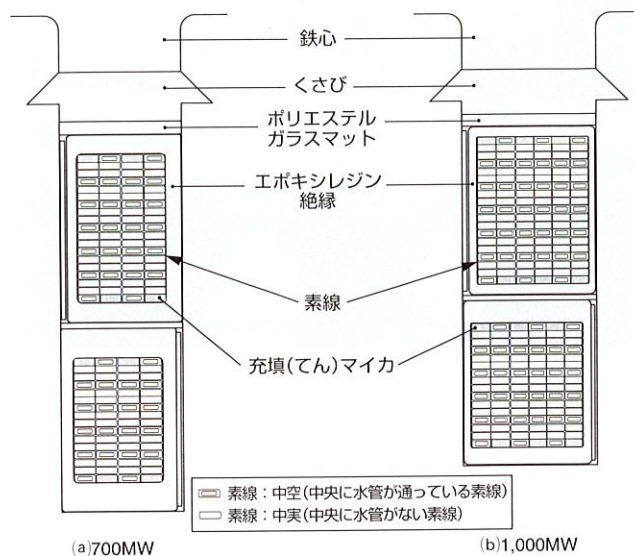


図2. ステータ巻線断面 巻線の素線構成は700MW, 1,000MWとも中空1段, 中実2段と同じであるが, 1,000MWは横配列素線数を6列とした。

Cross sections of stator windings in slots

2.2.3 ステータ鉄心端 アンペア導体数を増やすことは、ステータ鉄心端での漏れ磁束の増大を招く。大容量発電機は、ステータ鉄心端の鉄心ティース入射磁束の一部を吸収し、漂遊負荷損失を減少し、ステータ鉄心端の過熱を防ぐ磁束シャントをステータ鉄心に備えている。

この技術も、すでに実機に適用されているが、1,000MW機では電気装荷が増加するので、細心の設計が必要である。

2.2.4 軸材 二極タンデム60Hz 1,000MW発電機の軸材の強度レベルは、十分な安全余裕度を確保するため、1,000MPaを超える引張強度が要求される。1,000MW発電機の軸材の材質仕様は、運転実績のある950~1,000MPa級の引張強度をもつ発電機および低圧タービン軸の材料成分をベースに、小型鋼塊による各種シミュレーション試験結果から決めた。また、原材料選定段階から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取鍋(なべ)精錬を実施し、鋼質の清浄度を高め偏析および脆(ぜい)化傾向のない高靱(じん)性軸材とした。さらに熱処理では、降伏比を向上させるために二度の焼戻しを行う。

これらの検討の結果、1,000MW発電機のロータと同径縮長の実機大モデルロータの製作を経て、実機ロータ軸材を製作した。

図3に、実機ロータ軸材の機械加工後の外観を示す。

2.2.5 エンドリング材 ロータ巻線端部を固定するためのエンドリングは、大きな遠心力にさらされるため、発電機容量の限界を決めるに当たって、ロータ軸材そのものと同様にもっとも重要な構成要素の一つである。エンドリングは、鉄心端での漏れ磁束の低減と漂遊負荷損低減のた

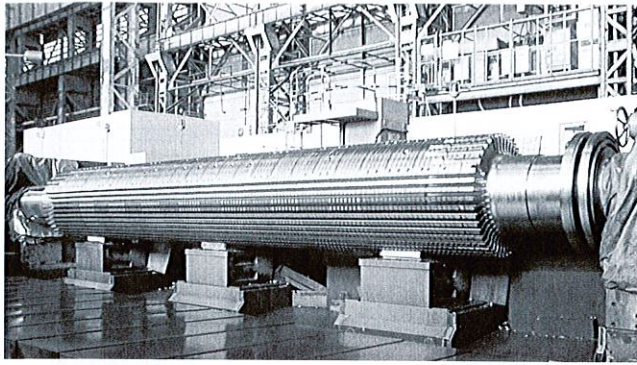


図3. 発電機ロータ 機械加工後のロータの外観を示す。
Generator rotor

めに非磁鋼が採用されているが、現在では優れた耐SCC (Stress Corrosion Cracking: 応力腐食割れ) 特性をもった非磁性18%Mn-18%Crオーステナイト鋼が標準材として使用されている。十分な安全余裕度を確保するため、1,000MW発電機のエンドリング材には1,300MPaの引張強度が必要である。

現在の18%Mn-18%Crオーステナイト鋼の強度を増すには、冷間加工比の増大と、窒素成分の増加という二つの方法が考えられ、これら二つの要因から定義される強度が変わるので、それらの最適な組合せを決定するために、同じ外径、内径を持ちながら長さがより短い試作リングを製作し、関連する材料製造技術の検証と材料試験を行なった。

リングの材料試験の結果に基づいて、最適な冷間加工比と窒素成分が決定され、実機寸法のエンドリングが成功裡(り)に製作された。偏析のない高純度で問題のない鋼塊を得るために、インゴット製作はESR(エレクトロスラグ再溶接)によって行なわれ、これらの結果を基に1,300MPaの強度の実機のエンドリングを製作した。

2.3 1,000MW実機大短尺モデルロータ

二極タンデム60Hz 1,000MW発電機と同じ直径の鉄心を短縮した実物大の発電機ロータを製作し、生産工程をとおして材料生産、加工と組立てを含むロータ製造技術の適切さと確実性を確認した。加えて、全体の設計と材料の信頼性を検証するために、起動および停止を含めた回転試験と励磁試験を行い、設計値どおりの結果を得た。

2.3.1 加工性 実機大モデルロータ製作過程において、軸材、エンドリング材の切削加工法について検証した。切削工具、切削条件の最適化により従来と同等の面あらさを確保できることを確認した。

2.3.2 回転試験

(1) 定格回転速度および過速度試験 ロータ構成要素の信頼性と応力解析結果を検証するために、定格速度

と115%の過速度回転試験を行い、応力値は設計値と実測値が一致していることを確認でき、十分な安全率を確保できた。

- (2) 起動停止繰返し試験 負荷調整運転を考慮しロータの500回以上の起動・停止試験を行なった。繰返し起動停止試験を終えた後に、ロータを分解し、シャフト、エンドリングと他の構成要素について、目視、MT (Magnetic Particle Testing: 磁場探傷検査)、PT (Penetrant Testing: 染色浸透検査) などにより詳細検査を行い、すべての構成要素の信頼性が検証された。
- (3) 励磁ヒートラン試験 ロータ巻線、固定子巻線から端子ブッシングに接続するための口出し導体および冷却ガスの温度上昇を確認するために、励磁ヒートラン試験を行い、構成要素の温度上昇は実績機レベルであることが確認された。すべての試験が完了した後、ロータ構成要素の目視・寸法検査と非破壊検査を実施した。その結果変形やクラックの兆候も見られず材料と設計の信頼性が実証された。

3 あとがき

二極タンデム60Hz 1,000MW発電機の設計、製作技術を大容量機器の蓄積された製造実績と運転実績、高い精度の解析技術、モデルテストをとおして確立した。

また、これらの技術は実機大モデルロータの製造、回転検証試験によりその信頼性は実証済みであり、現在、世界初の二極タンデム60Hz 1,000MW機は2001年の運転開始に向け設計、製造中である。



河合 幸彦 KAWAI Yukihiko
中部電力(株) 火力部建設グループ副長。
火力発電所電気システム・エンジニアリング業務に従事。
Chubu Electric Power Co.,Inc



赤見 敏明 AKAMI Toshiaki
電力システム社 火力事業部 火力プラント技術部主査。
火力発電所電気システム・エンジニアリング業務に従事。
Thermal Power Systems Div.



伊藤 裕道 ITO Hiromichi
電力システム社 京浜事業所 発電機部部長。
タービン発電機の開発・設計業務に従事。
日本機械学会会員、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 発電機部発電機設計担当グループ長。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