



## 高速起動によるワット数の向上

Alstom Power 社、Abaqus FEA を利用して蒸気タービンの効率を向上

蒸気タービンは現在幅広く利用されています。1884年に発明されて以来、蒸気タービンにより産業界の多くが同様に拡大しました。「完全なエンジン」と呼ばれることもある蒸気タービンは、熱を運動に、そして運動を電力に変換する効率に優れていたため、急速に蒸気エンジンに取って代わるものとなりました。また、その回転運動は、電気を作るための発電機の駆動における主要な動力源にもなりました。

現在、蒸気を動力源とするタービンは、世界の発電の約80パーセントを占めており、この状況は将来的にも継続するものと予想されています。しかし、エネルギー市場と経済の様変わり、そして効率向上とCO<sub>2</sub>排出量削減に向けた環境保護の圧力を鑑みて、蒸気タービンの性能は設計および最適化の観点で顕微鏡を用いるほどの詳細さで検討されており、各メーカーも発電所事業者も同様に、利用可能なエネルギーから最大限のワット数を引き出すことを目標としています。

### ワット数レースに勝つ

最新の蒸気タービンは以前のものよりも高い応力にさらされています。タービンを運転条件まで到達させる時間が短いほど、より多く

のエネルギーを発生させることができます。短時間での起動では、1時間以内に温度が数百度上昇することになるため、タービンに非常に大きな熱応力が生じます。以前は電力会社も起動に時間をかけており、4時間以上かかることが一般的とされてきました。その結果、応力にはるかに小さいものでした。しかし、現在の発電所事業者にはこのような余裕はなく、エネルギー生産量および効率を最大化するために起動時間を短縮することが求められています。

さらに、従来の発電所は長期間にわたって連続的に運転されてきましたが、最新の発電所やそれらを駆動する蒸気タービンでは、変化する運転条件に適応する必要があり、発電所が供給するピーク電力はほぼ毎日一定の比率で上昇および下降させる必要があります。また、コンバインドサイクル発電プラント（CCPP）はガスタービンと蒸気タービンの両方があり、これらの2つの動力源をきちんと切り替える必要があります。さらに、持続可能なエネルギー源に対するバックアップとなる発電設備は、気象条件が変化した際に素早く起動する必要があります。

これらの変化する運転条件下において、過渡

的な事象が一般的となり、2交代制や負荷追従運転などの予定外の運転も標準的なことになりました。スイスにあるAlstom Power社のプロジェクトマネージャーであるAndreas Ehrsam氏は、「蒸気タービンには、急速に起動し、迅速かつ予測可能な方法で負荷変動に対応して、これらの運転条件に付随する応力を許容できることが求められます。これらは最新の発電所および当社のエンジニアリングチームにとって重要な技術課題です」と述べています。これらの課題は将来的に増加し続けるものと考えられるため、Ehrsam氏は、「次世代コンバインドサイクル発電プラントの蒸気タービンにおける起動の目標時間は、30分を大幅に切ることで」とも述べています。蒸気タービンの設計および製造において100年の経験を誇り、世界中の発電所の25パーセントに主要設備を供給しているAlstom Power社が、タービン性能を向上させ、発電量を最大化する方法を継続的に模索している理由は容易に理解できます。

簡単に説明すると、蒸気タービンのローターは、回転ブレードの列の間にある固定ノズルからの高速蒸気ジェットのエネルギーを捕らえる回転ブレードの列で構成されています。蒸気タービンの運転における過渡的な現象の間

に、熱応力が生じて大きな疲労荷重の原因となります。また、この熱応力は厚肉のコンポーネントにおいて特に顕著です。それと同時に、タービンは高温での通常運転の結果として緩やかなクリープ荷重も受けます。長期間にわたるクリープ荷重と疲労荷重の組み合わせにより、さまざまな応力がタービンに加わり、最終的にはタービンの寿命を縮める可能性があるき裂の発生および進展につながります。

## 起動シミュレーションの自動化

Alstom Power 社では、長年にわたって蒸気タービンの起動プロセスの最適化を実施してきました。最適化には、強力な熱力学シミュレーション機能がある Abaqus FEA が利用されています。Abaqus FEA を利用する以前の同社における初期の最適化解析は有限差分法ソフトウェアと簡略化されたコンポーネントモデルに基づくものでしたが、FEA に移行することで、Alstom Power 社のエンジニアは、はじめに、一連の定義済みプロセスパラメータに基づいて、起動シミュレーションに使用する過渡的な温度境界条件を求め、それらの温度境界条件を検証するために有限要素解析を実行しました。この逐次的手法では、最適なプロセスパラメータに到達するために、単調な手動プロセスによる非常に多くの反復作業が必要とされました。

業務の柔軟性の向上と一層正確なモデリングの必要性により、Ehram 氏のエンジニアリングチームは、時間のかかる反復シミュレーションプロセスを回避するために Abaqus の自動化機能に目を向けました。また、最適化を自動化するために、Python (Abaqus カーネル・スクリプトインタフェースのプログラミング言語) を用いた自社内製の熱力学解析プログラムと Abaqus を連結する設計ツールを開発しました。Ehram 氏によれば、このソリューションによって内製プログラムと Abaqus/CAE の間で直接やりとりを行うことが容易になり、その結果、リアルタイムの熱応力に基づいて最適な過渡的な温度境界条件を決定し、フィードバック制御アルゴリズムを利用して最適なプロセスパラメータの探索を自動化するツールが得られました。Ehram 氏は次のように述べています。「このツールを使用することで、以前は不可欠であった非常に多くの手動による反復作業が不要になりました。その結果、シミュレーションプロセスが大幅に効率化されたのです」

自動化シミュレーションは、以下のように実施されます。まず、温度境界条件をタービンローターのモデルに適用するサブルーチンを Abaqus が呼び出します。次に、最初の時間ステップの温度境界条件を Alstom Power 社の熱力学解析プログラムに問い合わせます。

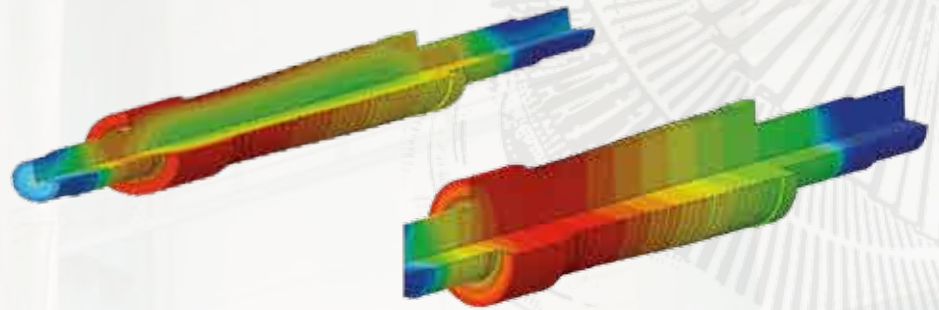


図 1 (左) 起動後 60 分におけるローターモデルの非定常状態の温度プロファイル。図 2 (右) ベース荷重におけるローターモデルの定常状態の温度プロファイル。画像提供: Alstom

この入力により、Abaqus は熱力学解析を完了させます。次の時間ステップの温度境界条件を計算するために、Abaqus は出力データベースから重要な場所の実際の応力を取り出し、最適な質量流量を決定するために制御アルゴリズムを呼び出し、この情報に基づく温度境界条件を Alstom Power 社のプログラムに問い合わせ、最後に熱力学解析を実行します。この計算ループが時間ステップ (問題により 10~60 秒) ごとに反復され、質量流量が応力限界に近付きながら超えないことを確認しつつ、重要な場所で計算された応力が材料の応力限界と比較されます。

## 自動化による反復作業の解消

新たに開発したツールを導入するために、Alstom Power 社は一般的な 60 分間の起動する蒸気タービンローターのシミュレーションを行いました。前処理、軸対称のローターモデルなどの単純な部品の 2 次元モデルの作成およびメッシュ分割、さらに Python スクリプトを用いた最適化の自動化の多くのステップで Abaqus が使用されました。複雑な 3 次元モデルは CATIA V5 で作成し、問題に応じて CATIA V5 Associative Interface for Abaqus または CATIA V5 Import 機能を使用して Abaqus にインポートされました。次に、エンジニアリングチームは Abaqus を使用してモデルのメッシュ分割を行い、ローターの有限要素解析を実行しました。その際、質量流量の制御および自動化のための時間ステップは 60 秒に設定されました。

シミュレーションを開始するために、Ehram 氏のチームは、起動前のコンポーネントの初期温度プロファイルモデル化しました。まず、タービンを電力網に同期する公称速度まで加速させ、次に、60 分間の起動を通じて、最終的にベースロードにおける定常状態の温度プロファイルに到達するまで (図 2 参照) ローターの最も温度が高い断面の最大応力がローター材料の応力限界の少しだけ下に維持されるように荷重勾配を最適化します (図 1 参照)。標準的なエンジニアリング PC 上で実行したところ、自動化した最適化には約 16 分間かかりました。従来の

手動計算に毎回かかっていた時間は今回の実行時間の約 1/3 のみでしたが、手動計算では実行するたびに手動で変更しなければならない推定値に基づいていたため、実際にはそれよりもはるかに多くの準備時間が費やされていました。

Ehram 氏は、「自動化プロセスの結果として、応力限界を超えずに最速の起動パラメータおよびプロセスを決定することができました」と述べています。これは、全体的な変形と熱の流れに基づくローターの溝の設計変更につながりました。また、Ehram 氏は、「逐次的な手法と自動化された手法を比較することで、自動化ツールを利用した時間短縮と精度向上が実証されました」とも述べています。従来の手動による手法を使用した起動最適化にかかる一般的な期間は約 10 人日でしたが、今回の新ツールを利用すると、わずか 5 人日に短縮されました。Alstom Power 社のエンジニアリングチームでは、自動化解析を従来のプロセスと比較して妥当性を検証し、結果データが良好に一致することを確認しています。

## 最大限のワット数を引き出す

今回のプロセスの自動化で得られたさまざまなメリットにより、Alstom Power 社では Isight の試験的な利用を開始することになりました。これにより、タービンの設計空間をより深く探索できることが期待されます。Ehram 氏は、「発電産業では、効率のわずかな向上により燃料費を年間で数百万ドル削減することが可能です」と述べています。これほどの規模の費用削減が得られるため、シミュレーションと最適化を併用してタービンから最大限のワット数を引き出すということは、今後電力会社にとってますます重要な要素となっていくことでしょう。

詳細は以下をご覧ください

[www.alstom.com](http://www.alstom.com)  
[www.simulia.com/cust\\_ref](http://www.simulia.com/cust_ref)