

発電用蒸気タービンのシミュレーション

1000 MW in the Test Lab

図 1:
蒸気タービン



図2：蒸気タービンのローターブレード

発電用蒸気タービン用の最新のデジタル制御システムは、非常に複雑な制御機能を持っています。試運転中にタービン制御機能のテストを実施することは、非常に多くの時間とコストがかかります。したがって、プロジェクトの早い段階でテストラボにおいてシミュレータを使用することが有効なソリューションとなります。また、シミュレータには、プラントにリスクを与えずに危機的な状況をテストでき、早い段階で標準化されたテストを行うことによって不良を検出し修正することができるという利点があります。これは、高い品質基準を確実に達成するための重要な要素です。

最高の効率を実現する最新の蒸気タービン

ドイツでは、電力の3分の2以上が蒸気タービン発電機によって発電されています。世界中で同様の状況となっており、これからも引き続き蒸気タービンが発電における重要な役割を担っていくと予想されています。信頼性と効率性は、最高の節約と環境への影響を最小化する上で不可欠で

す。40年以上の実績がある Siemens 社は、数 MW から 1,900 MW の発電量に対応した蒸気タービンを製作しています。今では、蒸気タービンの温度は最大 600°C、また圧力は約 275bar となっており、48% を超える発電効率の達成が可能となっています。燃料の使用効率は、熱抽出によってさらに向上させることができます。さらに蒸気タービンをガスタービンと

組み合わせることで、60% を超える効率を達成できるまでになっています。このような数値は、数年前までは不可能であると考えられていました。

増加し続けるタービン制御への要求

操作の信頼性は、個々の発電プラント用に設計された最新のタービン制御システムに依存しています。機能の複雑さは確



図3：Siemens AG の T3000® タービン制御システムで自動化された大型蒸気タービン発電プラント

実に増大しており、ソフトウェア機能の計画書が 500 ページを超えることも珍しくはありません。ドイツでは、再生可能エネルギーへの移行に関する野心的な目標によって、配電網の中にある発電所の運転に対しては厳しい要求が突きつけられています。再生可能エネルギーの供給量は、総量としては増加していますが変動があり、消費需要と一致することはほとんどありません。そして、適切な電力貯蔵システムが不足していることもあり、発電所は電力需要に合わせて出力をすばやく調整する必要があります。このような理由で、これらの要求と、蒸気タービンのプロセス制約を調整できる制御技術が求められています。

複雑さと高い品質要求に対処するただ 1 つの方法は、開発段階で適切なシミュレータを使用して、個々の発電プラントに

適した制御技術を設計することです。テストラボで制御システムの最適化が既に終了していれば、試運転をより迅速に行うことでコストを削減し、実物のタービン寿命を縮めてしまうテストを回避できます。さらに、発電所のオペレータが、テストされていない制御機能を使用してタービンを運転するリスクもなくなります。

蒸気タービンセットのシミュレーション

制御システムのテストでは、すべての機能を現実的な環境でテストするために、蒸気タービンのモデルだけではなく、発電機と配電網のモデルも必要です。標準的な蒸気タービンは、高圧部、中圧部、低圧部で構成されており、共通軸により連動して駆動されます。ボイラー（蒸気発生器）で生成された蒸気は、最初に、主蒸気弁を通して高圧部に流入します。その後、

再び過熱蒸気の状態にされてから、インタセプト弁を通して中圧部と低圧部に供給されます。水蒸気は復水器で冷却されて水となり、給水ポンプ経由で蒸気発生器に戻されます。発電機は、シャフトの機械エネルギーを電気エネルギーに変換し、変圧器を介して配電網に供給します。したがって、シミュレーションモデルには、これらのコンポーネントのすべて、および配電網の単純化されたモデルが含まれている必要があります。これは、タービンの始動から定格速度になるまで、発電機と配電網の同期、および定格出力よりタービンの負荷運転といった正常動作をシミュレートするために不可欠です。他の発電プラントが運転を停止した場合は、配電網を支援するために、蒸気タービンの出力を自動的に急上昇させる必要があります。予想外の故障が原因で発電プラ

「dSPACE シミュレータと MATLAB/Simulink モデルの組み合わせは、当社のすべての要件を満たしています。別の種類タービンに切り替えて、発電プラント固有のパラメータ設定をロードすることも簡単にできます。これまで試運転をするまで現れることがなかった問題を、今ではテストラボで検出して解決できるようになりました」

Michael Schütz 氏、Siemens 社

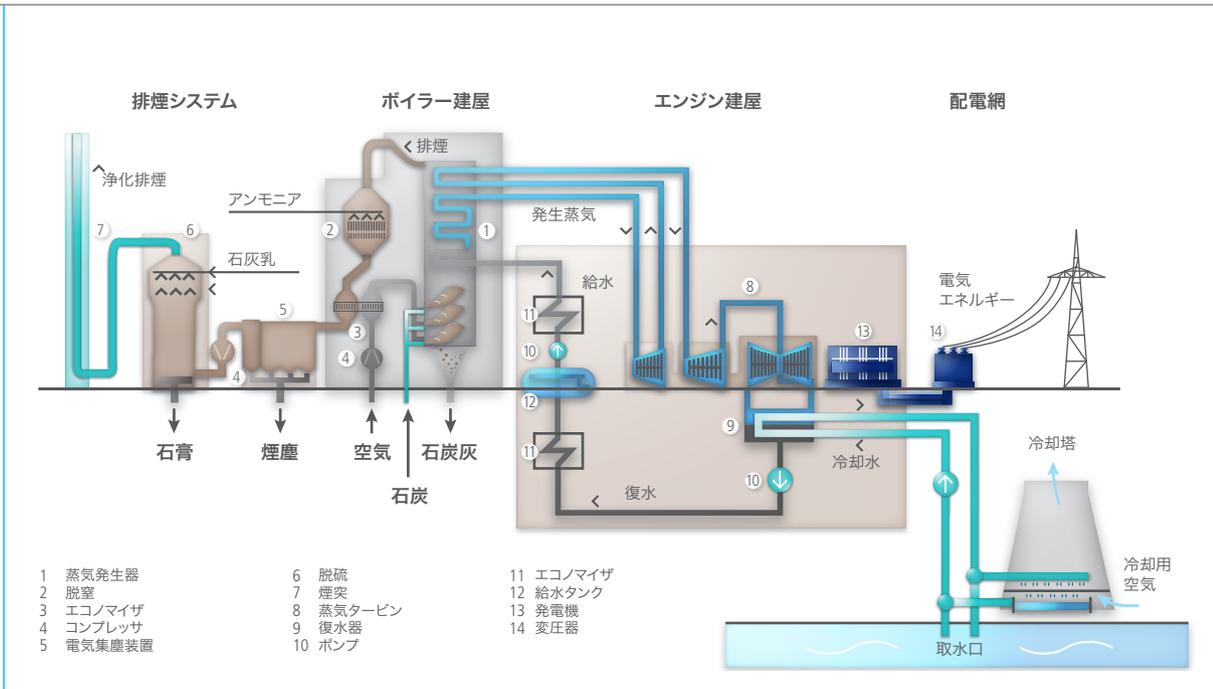


図 4：最新の蒸気タービン発電プラントの概要

トが配電網から切り離された場合は、タービンをトリップさせずに、負荷遮断を実行する必要があります。

リアルタイムシミュレータの要件

Siemens 社のエンジニアは、蒸気タービンをシミュレートするリアルタイムシミュレータの仕様書を作成しました。

- モジュール化されたモデルで、Siemens 社の全機種の蒸気タービンに対応

- 発電プラント固有のパラメータ設定を容易に行えること
- ステップサイズが 1ms のリアルタイム機能で、高速過渡応答に対応
- シグナルコンディショニングにより、調整なしで制御システムに直接接続
- 柔軟な調整オプション
- シーケンス制御と文書化を行うための使いやすいヒューマンマシンインターフェース
- モデル、シミュレーションまたは計測結果のデータ交換に使用する MATLAB®/ Simulink® 用インターフェース

果のデータ交換に使用する MATLAB®/ Simulink® 用インターフェース

dSPACE シミュレータ

Siemens 社は、柔軟な dSPACE システムを選択しました。DS1005 PPC Board によって、50 以上の状態変数がある蒸気タービンセットのモデルを、要求された 1ms のステップサイズで問題なく計算処理することができます。32 個のアナログチャンネルを搭載した I/O ボード

図 5：デジタル制御システムのテストでは、シミュレータと制御システムは、速度、出力電力、主蒸気圧、および各弁の作動状態と位置フィードバックなどの信号をやり取りします。

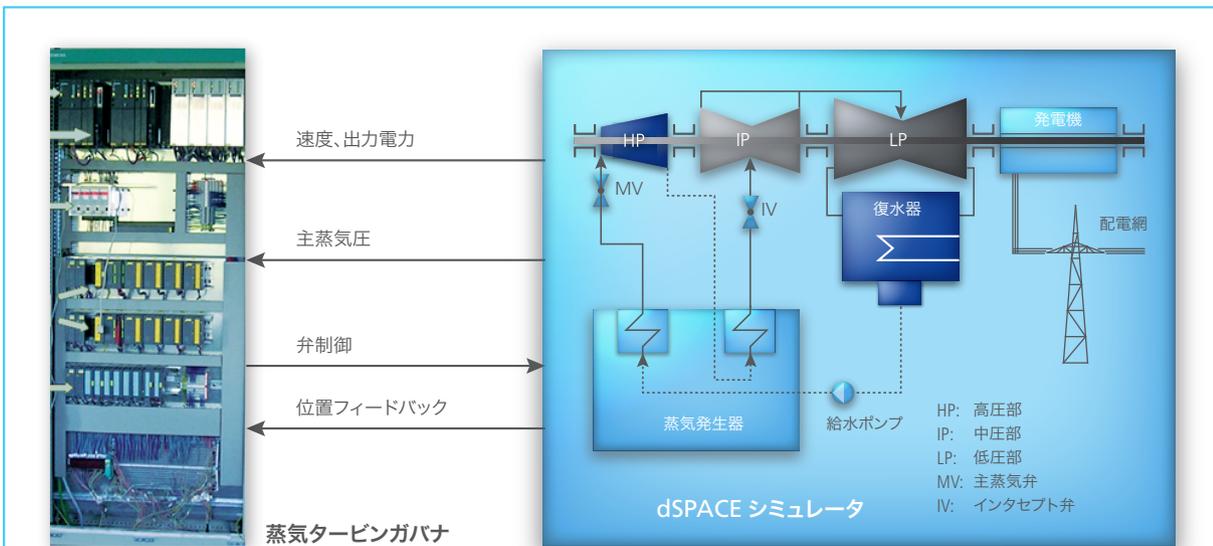




図 6 : 試験施設内に設置された、シミュレータを含むテストラポアセンブリ

が入力用と出力用に 2 枚ずつ使用され、タービン制御システムへの接続に必要な多数のアナログ入出力信号を提供します。デジタルチャンネルを搭載した 3 枚の I/O ボードが、タービンのバイナリ信号と回転パルスを提供します。すべてのボードは、dSPACE 拡張ボックスに装着されています。バッファ増幅器は、アナログ信号の電位分離と調整を行います。また、デジタル信号は、電気的に絶縁および保護されています。幅広く使用されている MATLAB/Simulink ソフトウェアと連動させること

で、蒸気タービン制御の複雑な問題に関与している Siemens 社の他の部門との連携を容易にしています。また、モデルとパラメータの妥当性は、稼働している発電プラントで計測を行うことによって簡単に確認できます。

ヒューマンマシンインターフェース

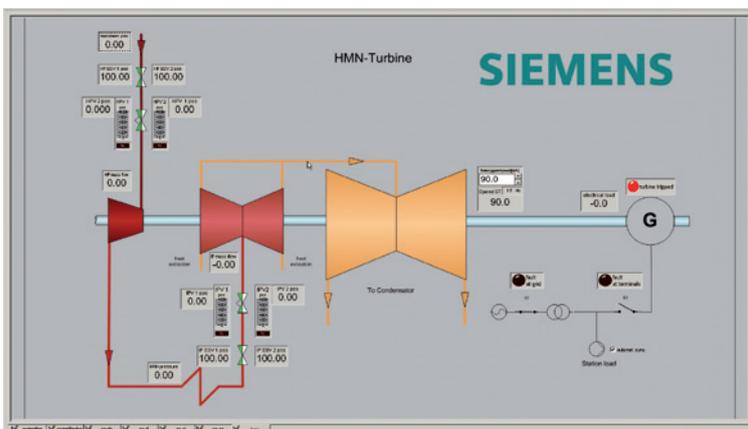
シミュレータには、各発電プラントの種類に合ったグラフィカルな専用のヒューマンマシンインターフェースが搭載されています。このインターフェースは、国際的な発電プラント市場の要求に対応するために

バイリンガル表示を採用しています。タービンの始動から定格速度になるまで、発電機と配電網の同期、および負荷運転が、接続されている制御システム上のスイッチと入力を用いてシミュレートされます。その他の多数の機能によって、正常動作時と故障時の両方における包括的なテストオプションが提供されます。すべての信号を記録して、分析することができます。

テストの流れ

標準的なテストは、タービンの始動から

図 7 : すべての関連する変数の監視は、タービンの高圧部、中圧部、低圧部、および弁をシミュレートするシミュレータのヒューマンマシンインターフェースで行うことができます。



Martin Bennauer 氏
同氏はシミュレータの開発を統括しており、Siemens AG (ミュンヘン、ドイツ) で蒸気タービンコントローラを担当しています。

Achim Degenhardt 氏
同氏は Siemens AG (エルランゲン、ドイツ) でシミュレータの開発を統括しています。



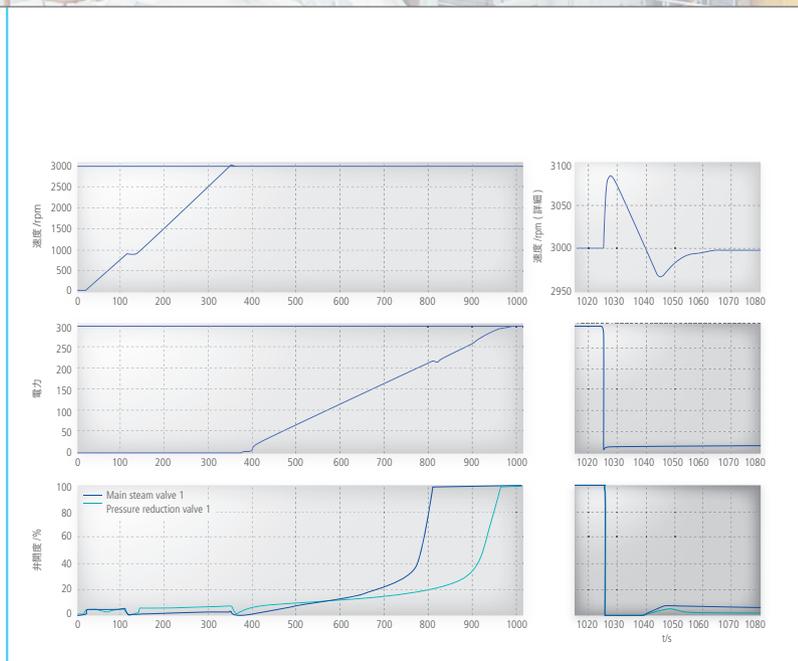


図 8：弁をわずかに開くだけで、タービンの回転は定格速度まで上昇します。インタセプト弁は、最初は閉じていますが、主蒸気弁を開いた後に開きます。配電網との同期が完了すると、タービンは最大出力による負荷運転の状態となります（左側）。発電プラントが配電網から切断された場合は、出力電力は、所内単独運転のレベルまで瞬時に低下します（右側）。弁をすばやく閉じると、速度が約 103% まで上昇し（危険な値ではありません）、その後、適切な減衰によって定常状態に到達します。

定格速度まで上げるところから始まりまず、50Hz の場合の定格速度は、3,000rpm となっています。電圧、速度、位相位置が的確である場合は、発電機は配電網に接続され、最大出力によるタービンの負荷運転が可能となります。最大出力運転時に配電網の故障が原因で蒸気タービンセットが配電網から切断された場合は、圧力を発電プラントの所内単独運転時の圧力まで降下させる必要があります。主蒸気弁とインタセプト弁を

すばやく閉じて、許容範囲を超えた過速度になるのを防止する必要があります。最初に、タービン内にある多量の蒸気によって速度が上昇します。同時に、発電プラントの所内単独運転を行う必要があります。これは、速度を許容範囲内に維持できるかどうかにも左右されます。弁を閉めるのが遅すぎた場合、許容範囲を超える過速度となり、タービンセットに危険な兆候があれば保護システムが作動することになります。ただし、発電プラントは、

それによって停止されてしまい、それ以後の所内単独運転が不可能となります。■

Martin Bennauer
Achim Degenhardt
Dr. Rüdiger Kutzner
Patrick Müller
Christoph Schindler
Michael Schütz
Dr. Andree Wenzel

Dr. Rüdiger Kutzner

同氏はドイツ、ハノーファー応用科学芸術大学の第一学部、電気工学・情報技術学科で制御工学の教授を務めています。

Patrick Müller 氏

同氏は Siemens AG (エルランゲン、ドイツ) でコントローラ機能テストの実施を担当しています。

Christoph Schindler 氏

同氏は Siemens AG (ミュールハイムアンデアール、ドイツ) で蒸気タービンのモデリングを担当しています。

Michael Schütz 氏

同氏は Siemens AG (エルランゲン、ドイツ) で蒸気タービン制御技術の自動化を担当しています。

Dr. Andree Wenzel

同氏は Siemens AG (エルランゲン、ドイツ) で蒸気タービンと発電機のリアルタイムシミュレーションのチームリーダーを務めていました。2月1日からは、ドイツ、ハノーファー応用科学芸術大学で電力工学科の教授となっています。

