

信頼性を高める電力分野の最新シミュレーション技術

Latest Simulation Technologies Improving Reliability of Electric Power Systems

瀬川 清 Segawa Kiyoshi 高橋 康雄 Takahashi Yasuo 樋口 眞一 Higuchi Shinichi
 羽江 隆光 Hae Takamitsu 富田 泰志 Tomita Yasushi 西 高志 Nishi Takashi

電力分野の主力製品である火力、原子力発電プラントにおいては、さらなる発電効率の向上と信頼性の確保が求められている。また、再生可能エネルギーの連系増大が想定される中で、安定かつ経済的な電力供給を可能とするスマートグリッドの実現が必要とされている。

日立グループは、これらの製品の研究開発において、実際のプラントの運転条件や非正常事象を模擬するために、実証試験と合わせて数値シミュレーション技術を積極的に取り入れて実用化に取り組んでいる。

1. はじめに

社会インフラの根幹を支える電力エネルギーの安定供給を持続するため、発電設備の効率向上、信頼性の確保が最重要な課題となっている。また、再生可能エネルギーの大量導入時代に備えて、系統連系に対応する技術の確立が不可欠である。

ここでは、電力分野の主力製品である蒸気タービン、ガスタービン、発電機、およびスマートグリッドの研究開発において、実証試験に先立ち活用されている最新のシミュレーション技術について述べる。

2. 蒸気タービンのシミュレーション

最新鋭の超々臨界圧蒸気タービンでは、入口の主蒸気圧力25 MPa、主蒸気温度600°Cの高圧・高温からタービン出口の5 kPaの真空まで蒸気は膨張する。低圧タービン後方段では非平衡凝縮によって発生した水滴を伴う気液二相流状態（湿り蒸気）となるため、これらの蒸気性質を考慮した圧縮性蒸気のCFD（Computational Fluid Dynamics：数値流体力学）に基づく解析技術が必要となる。一方、低流量および高排気圧力下で発生する低圧最終段からの逆流は、蒸気タービン特有の事象である。逆流の発生によって

励振力が増大し、翼の信頼性に大きく影響する。信頼性を確保するうえからも励振力を評価することは重要であり、三次元的な非正常現象を高速で解ける流体シミュレーション技術が必要となる。

日立製作所は、これまで、性能向上だけではなく、信頼性確保の点でも数値シミュレーション技術を活用し、対象に応じて自社開発してきた。これら自社解析コードは汎用コードとともに、要素実験や総合試験で十分な検証を経て実機設計に活用されている。

蒸気流れの定常・非定常シミュレーション技術を実証試験設備に適用した結果について以下に述べる。

2.1 高圧タービン

数値解析技術の進歩と計算機の高速化により、高圧タービンのような多段落タービンのフローパターンや性能評価が比較的短時間で可能になっている。与えられた多段タービン構造および出入口の境界条件の下でのタービン性能や最終段落出口でのフローパターンの予測精度の検証は重要である。解析検証に用いた蒸気タービン高圧段試験設備を **図1** に、三次元多段落蒸気流れ解析（CFD解析）結果を



図1 | 検証試験設備

蒸気タービン高圧段の性能・信頼性試験が可能である。

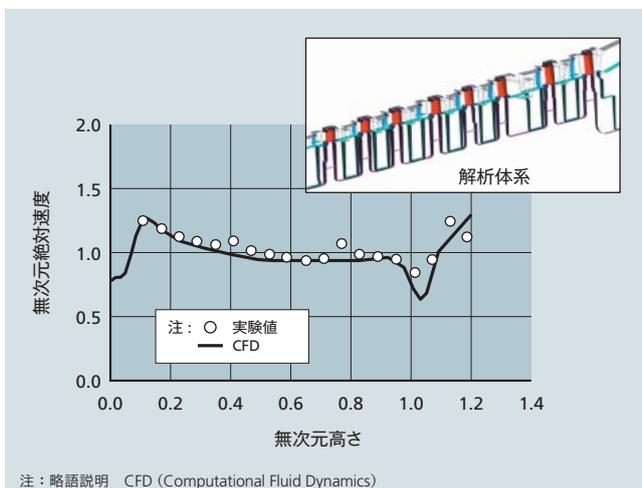


図2 | 三次元多段落蒸気流れ解析 (CFD解析) 結果
多段落出口で解析結果と実験結果の一致を確認した。

図2に示す。

解析体系は図1に示す試験装置と同様な構造を採用し、ノズルダイアフラム部および動翼先端部のシール部分を含む。三次元多段落CFD解析は、実験結果と比較してフローパターンや性能の予測精度が高いことを検証し、実機設計に活用している。

2.2 低圧タービン

前述したように、低圧タービンでは低流量および高排気圧力下では体積流量が減少する場合、最終段から逆流が生じ、タービン負荷の減少とともに上流側に波及する。この低負荷流れ場に対し準三次元多段落非定常解析を行い、実験計測による逆流域と比較検証した。一例として極低負荷 (5%) に対する平均流れ場の解析結果 (流跡線) を図3に示す¹⁾。逆流域は解析と実験結果でよい一致を示し、極低負荷の多段落にわたる逆流を精度よく解析できることが明らかとなった。また、流路側壁部の変動圧力振幅も各負荷条件での実験結果と比較してよく再現できていることを確認している。以上のように、準三次元多段落非定常解析により、低負荷時の非定常流れ場を精度よく評価できること

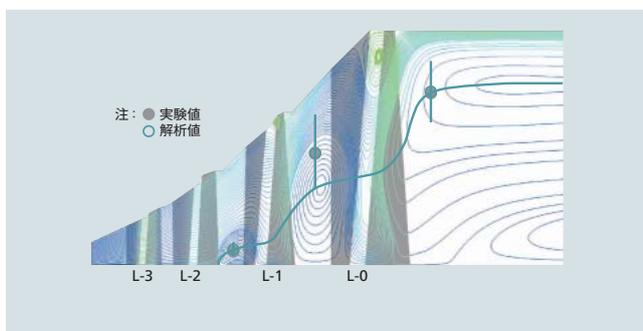


図3 | 準三次元多段落非定常解析結果

図の青線は平均流れ場の逆流域の最大高さ、黒丸は実験値、青丸は解析の各時刻の逆流最大高さの時間平均値、鉛直線はその標準偏差を示す。

から、翼に対する流体励振現象の評価および信頼性を確保した設計を可能とした。

3. ガスタービンのシミュレーション

3.1 圧縮機的全段解析

ガスタービンは圧縮機とタービンとともに回転する動翼と静翼から構成されるターボ機械である。日立H-25ガスタービンの半開放写真を図4に示す。H-25ガスタービンの軸流圧縮機に流入する大気の流れは、圧縮機入口の初段動翼では流入速度が音速を超える。一方、圧縮機の内部の流れは、減速されながら出口で1.5 MPaまで昇圧される。このような多段軸流圧縮機の翼列内の流れは三次元性が強くなるため、翼列性能と信頼性を両立させる設計技術として三次元乱流解析が要求される。

圧縮機の上流側の遷音速翼列では流入マッハ数が1以上となるので、翼負圧面上に発生する衝撃波の位置および衝撃波と翼面境界層の干渉による衝撃波損失の予測が重要となる。また、圧縮機の下流側の亜音速翼列では翼長も短く低アスペクト比の翼列であり、側壁境界層の発達による二次流れが支配的になる。そのため、翼列間の流れを三次元的に評価して二次流れ損失を高精度に予測できる手法が必要となる。さらに、多段軸流圧縮機は流れ方向に対して、複数の動静翼列から構成されるので、動静翼列間の流れのマッチングの評価が重要となる。

従来の設計技術では、準三次元的な流れ解析手法を用いて圧縮機的全段の性能を評価してきたので、流れの三次元性の影響についてはモデル化に依存していた。また、三次元CFD解析についても圧縮機を複数段に分割して解析していたので、後段側の流れ場を対象とした解析には、側壁境界層の発達を高精度に予測することが課題であった。

近年では計算機の高性能化、高速化、大容量化が進み、軸流圧縮機的全段を同時に定常解析することが可能になっ

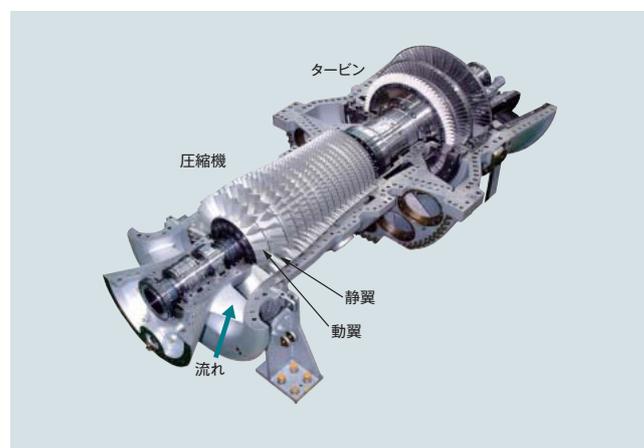


図4 | 日立H-25ガスタービン

H-25ガスタービンケーシングおよびロータ半開放写真を示す。

ている。軸流圧縮機の全段解析結果の一例を図5に示す。この解析に用いた計算格子は全体で約1,400万点の計算モデルである。乱流モデルは高精度なモデルとして定評のあるSST (Shear Stress Transport) モデルを用いている。この解析では、動静翼の先端間隙の設定、中間段におけるタービン翼冷却空気およびシール空気の抽気を考慮したモデルにすることで、実際の運転状態を高精度に再現できるようにしている。動静翼列間の境界条件や乱流モデルといった実現象に対してモデル化は必要としているが、実測とCFDによる圧縮機全体の流れ場の予測精度は誤差1%以内であり、高精度な数値シミュレーションが行えるレベルまで達している。

圧縮機のさらなる高効率化と信頼性を高めるために、シミュレーション技術は必要不可欠である。日立グループは、圧縮機翼列の損失の低減を目的に、CFDに最適化アルゴリズムを導入した三次元翼の最適化設計ツールの研究開発を推進している。最適化ツールを用いた三次元翼では、遷音速翼列の衝撃波損失の低減と亜音速翼列の二次流れ損失の低減を実現できる²⁾。また、流体解析と要素試験による検証とを関係させてシミュレーション技術の高度化を図っている。ここでは圧縮機の定常解析の一例について紹介したが、圧縮機では起動時の旋回失速や部分負荷における非定常な流体現象を解明することが重要な研究である。これには流体解析技術と構造解析技術を組み合わせた連携、連成解析が必要となる。

今後、圧縮機全体やガスタービン全体を非定常で解析する大規模シミュレーションが可能になる時代に向け、継続的にシミュレーション技術の高度化を進めている。

3.2 タービンの全段および単段解析

ガスタービンのタービンは、前述した蒸気タービンおよび圧縮機と同様に複数の段落から成るターボ機械であるが、外部から供給された冷却空気を用いて翼およびガス流路を囲む側壁を冷却しているという点で大きく現象が異なる。タービン入口における主流ガス温度は1,300°Cを超え

る高温であるため、冷却が不可欠である。一般的に翼内部に流路を形成し、冷却空気を流すことによって壁面から熱を奪って冷却するという方法が採られる³⁾。冷却後の冷却空気は翼表面に形成された孔から放出され、主流ガスに混入する。また、この冷却空気に加えて、高温の主流ガスが静翼と動翼の軸方向に存在する間隙に浸入しないように計画的に流すシール空気も不可欠である。このシール空気も最終的に主流ガスに混入する。

冷却空気とシール空気は、前節で述べた圧縮機が圧縮した大気の一部が充てられているが、少ないほどガスタービンの熱効率が高くなる。タービンの性能および信頼性を追求するためには、主流ガスに加えて冷却空気とシール空気の挙動も模擬する流れ解析と、これら流体と接するタービン構造体の伝熱解析および応力解析とが重要であり、それぞれの数値シミュレーションに高い精度が要求される。日立グループでも研究開発を通して、設計に活用する数値シミュレーションを高度化している。その一例を以下に紹介する。

1990年代に解析時間と精度の観点から三次元定常乱流解析が設計に使用できるレベルとなり、その後、徐々に解析領域を拡張してきた。現在では、タービンの入口と出口状態のみを境界条件として与え、全段を同時に解析するに至っている(図6参照)。実際のタービンの流れは、燃焼器出口から複数の段落(一つの段落は静翼と動翼の組み合わせ)およびディフューザを通過する非定常流れであるが、設計目的に合わせて定常解析、各要素1流路ずつの非定常解析あるいは全周非定常解析など、異なる解析条件を使い分けている。

例えば、タービン性能の推定には短時間で評価できる定常解析を利用している。ガスタービン特有の現象は、前述したように冷却およびシール空気の混入である。これら空気の総量は排気ガス量の2割程度にもなる。全段解析においては、これら冷却およびシール空気の混入を模擬するとともに混入によって組成が変化し、物性が変化することも考慮している。数値シミュレーションの黎明(れい)期は完全気体を想定した解析であったが、特にタービンの場合は熱落差が大きいためからガス温度が大きく変化するため、この条件下ではマッハ数に影響が及び、実測値と差異が大きくなるという課題があった。実在気体と同じく比熱を温度の関数とすることにより、この問題は緩和されている。日立グループでは、冷却およびシール空気の混入に伴う主流ガスの組成変化に起因する物性値の変化も考慮するようにした。これにより、解析精度の向上が確認されている。その効果は、現在研究を進めている高湿分空気利用ガスタービンにおいて顕著に現れる。

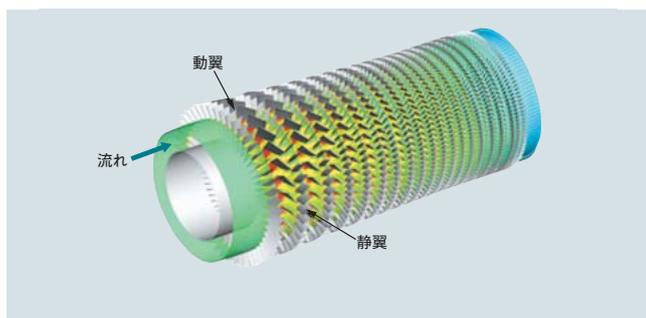


図5 | 軸流圧縮機の全段解析
軸流圧縮機の全段解析による翼列間流れのマッハ数の等値線を示す。

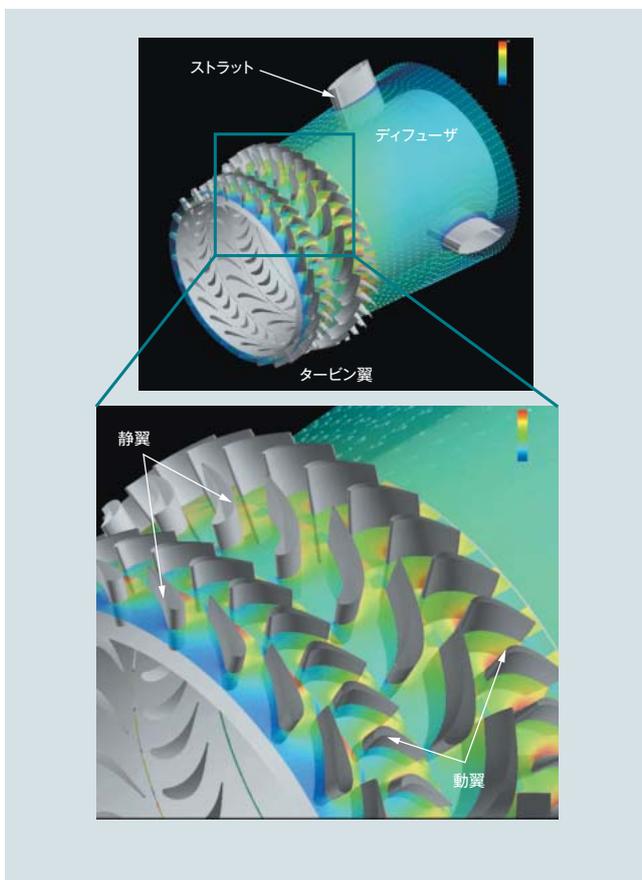


図6 | タービン全段解析
タービン2段とディフューザを一体解析する。

信頼性評価を主目的とした数値シミュレーションについて以下に紹介する。前述したようにタービン翼は冷却が不可欠であり、信頼性はメタル温度と応力によって評価される。平均メタル温度と応力の評価は、まず、流れ解析によってタービン翼外部の主流ガス流れと、タービン翼内部の冷却空気流れを解き、メタル表面温度を求める。この際、流体が翼と授受する熱流束は仮定値である。次に翼の伝熱解析により、流体と授受する熱流束を求める。この際、流体との接触面における温度は先ほどの流れ解析結果を用いる。この後、流れ解析時に仮定した熱流束と、伝熱解析で得られた熱流束とが一致するまで流れ解析と伝熱解析を繰り返す。最後に得られた結果を境界条件として応力解析を行う。このような支配方程式が異なる現象を統合的に解く解析はマルチフィジクス解析と呼ばれ、今後設計において重要な役割を果たしていくものと考えられる。

そのほか、解析技術に関連して、流れ解析および構造解析用計算格子の自動生成や最適化設計技術などの研究も継続的に行っている。

4. 発電機のシミュレーション

4.1 開発課題と対応状況

タービン発電機では、近年の電力需要増加や地球環境保

護の観点からの大容量化や高効率化、コスト削減のための小型化が求められている。現在、タービン発電機の設計、開発の各段階において、機械強度、振動、冷却性能といったさまざまな評価に、実証試験とともにシミュレーション技術が活用されている⁴⁾。タービン発電機の大容量化や小型化は、発熱密度上昇を招く要因となるため、冷却性能の評価が重要である。以下では、冷却性能評価のための三次元通風伝熱解析技術について述べる。

4.2 三次元通風伝熱解析技術

タービン発電機は、機内に冷媒気体を循環させて、電気損や機械損に起因する熱を除去して冷却する。タービン発電機の端部領域(図7参照)は、ステータコイルエンドやその支持板などの影響で冷媒気体の流れが複雑になる。また、端部領域の構造物には、漏れ磁界に基づく損失が発生する。端部領域の構造物を効率よく冷却するためには、通風特性と発熱分布を把握し、局所温度を評価する必要がある。そこで、端部領域全周を対象として、流体と固体温度を同時に求める三次元通風伝熱解析技術を開発した。

解析モデルでは、ステータコイルエンド周辺の構造物の詳細形状を反映し、冷媒流れの解析精度を確保した。一方で、ステータコア内部を冷却する通風ダクトについては、熱伝達率実験式を解析モデルに組み込むことで、温度計算精度の維持と計算負荷低減を両立させた。さらに、局所温度分布の予測精度を向上させるため、電気損については、端部同一領域を対象とした電磁界解析によって得られた三次元損失分布を解析モデルに用いた。

4.3 解析結果

三次元通風伝熱解析技術を空冷式タービン発電機に適用

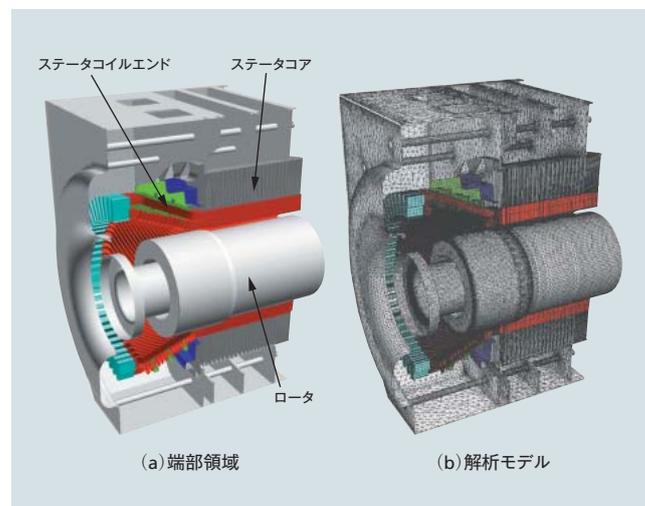


図7 | タービン発電機端部領域と解析モデル
電磁界解析による三次元損失分布を反映した流体・固体伝熱連成解析で、通風特性と局所温度を同時に評価可能とした。

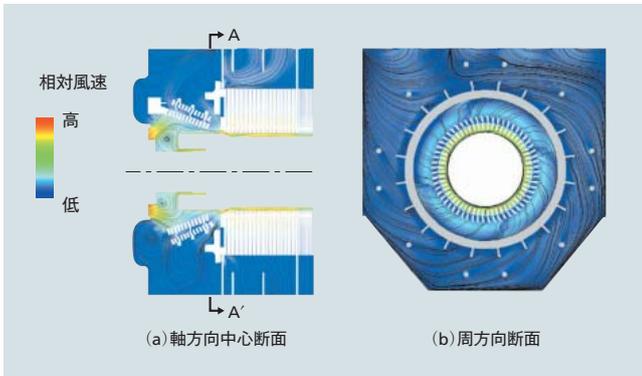


図8 | 風速および流线分布
タービン発電機内の冷媒気体流れを詳細に解析した例である。(b)の周方向断面は、(a)の軸方向中心断面のA-A'矢視図を示す。

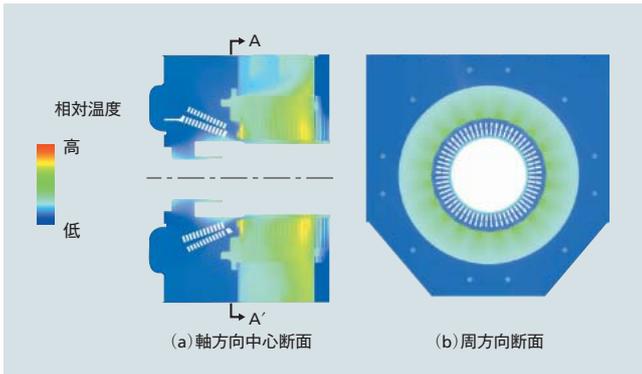


図9 | 温度分布
冷媒気体および構造物内部の局所温度を解析した例である。(b)の周方向断面は、(a)の軸方向中心断面のA-A'矢視図を示す。

した結果、端部構造物の詳細形状の影響を考慮した風速および流线分布が把握でき(図8参照)、構造物と冷媒気体双方の温度分布が評価可能となった(図9参照)。構造物、冷媒気体温度の解析結果は、実測値によって検証済みである。この解析技術の適用により、タービン発電機端部の三次元損

失分布を考慮した局所温度を評価できるようになり、設計段階で冷却構造のさらに詳細な検討が可能となる見通しを得た。

5. スマートグリッドシミュレータ

5.1 スマートグリッドシミュレータの概要

再生可能エネルギーの連系増大、電気自動車の導入拡大など、電源と需要が多様化する中で、安定かつ経済的な電力供給を可能とするスマートグリッドの実現が求められている。これに対し、タイムリーなソリューション提案のため、機器や制御システムの設計および導入効果を迅速に解析できるエンジニアリング環境としてスマートグリッドシミュレータを開発した。

このシミュレータでは、配電系統、電圧調整機器、電気給湯器や電気自動車などの需要家機器、太陽光発電設備、需要家、各種の制御サーバのモデルを、それぞれ個々のモジュールとして実装し、それらを必要に応じてネットワーク上で相互接続させるプラグアンドプレイ型モジュール統合基盤を開発した。これにより、解析対象を柔軟にモデル化し、再生可能エネルギーが電力系統に与える影響の解析環境や、電圧安定化制御、デマンドサイドマネジメントなど新ソリューションのプロトタイプを短時間で構築することが可能となった(図10参照)。

5.2 適用事例

スマートグリッドシミュレータ上に、太陽光発電地産地消制御のプロトタイプを開発した。太陽光発電の導入拡大ではその余剰電力や逆潮流が電力系統に及ぼす影響が懸念されているが、この制御は、地域内の太陽光発電の余剰電

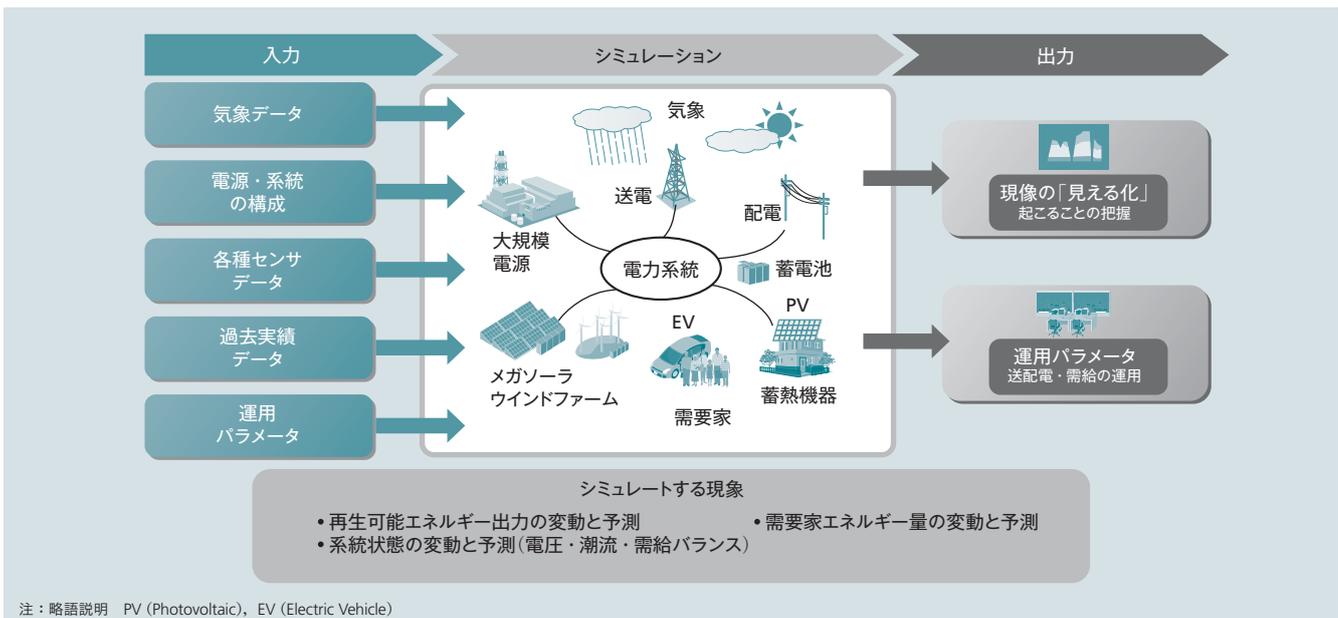


図10 | スマートグリッドシミュレータの全体概要

今後予想される電源と需要の多様化において、供給サイドと需要サイドの相互作用をシミュレーションし、計画から運用までを支援する。

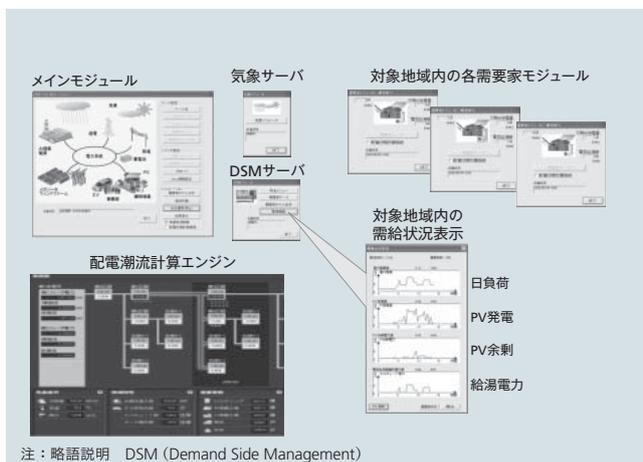


図11 | 太陽光発電地産地消制御プロトタイプのパラメータ構成/主要画面
スマートグリッドシミュレータのプラグアンドプレイ型モジュール統合基盤
で各モジュールを接続し、プロトタイプを構成した。

力を、その地域内の電気給湯器の蓄熱運転に活用して吸収するものである。特に、複数宅の電気給湯器を機器の効率特性や温水需要を考慮して最適に台数制御し、吸収力と全体効率を最大化する点に特徴がある。

このプロトタイプは、配電系統の各点の電圧/電流などの状態値を計算する潮流計算モジュールと、太陽光発電設備の発電量や、電気給湯器の熱供給量や電力消費量、また、需要家の電力消費量や温水消費量を模擬する需要家モジュール、気象シナリオデータを乱数で発生させる気象モジュール、複数宅の電気給湯器の蓄熱運転計画を策定するデマンドサイドマネジメント制御サーバモジュール、さらに、各モジュールを統括するメインモジュールで構成した。

潮流計算モジュールは、需要家モジュールが模擬する需要データを収集して配電系統全体の状態値を決定し、一方、需要家モジュールは潮流計算モジュールが模擬する連系点の電圧値を取得して太陽光発電設備の電圧上昇抑制機能による発電量抑制を計算するなど、各モジュールが連動しながら動作する(図11参照)。

このプロトタイプを用いて、一般家庭を対象としたケーススタディを行った結果、家1軒1軒の個別制御に対して、3軒全体での群制御により、余剰電力の吸収率を1.6倍に向上できる結果を得た。そのほか、電気自動車の普及拡大による電力系統への影響を緩和する充電調整制御⁵⁾、インセンティブによって需要家の需要量を目標値へ誘導するデマンドレスポンス制御のプロトタイプを開発した。先に開発した潮流計算モジュールや需要家モジュールなどを活用することで短時間に構築することができた。今後、さらに、蓄電池など、モデルを拡充していく予定である。

6. おわりに

ここでは、電力分野の主力製品である蒸気タービン、ガ

スタービン、発電機、およびスマートグリッドの研究開発において、活用されているシミュレーション技術について述べた。

電力の安定供給のため、発電、送変電システムのさらなる高効率化、信頼性、安全性の向上が求められる。今後も最先端のシミュレーション技術を駆使して、これらの要求に応えていく考えである。

参考文献

- 1) S. Senoo, et al. : Computations for Unsteady Compressible Flows in a Multi-Stage Steam Turbine with Steam Properties at Low Load Operations, ASME POWER2010-27096 (2010.7)
- 2) Y. Takahashi, et al. : Experimental and Numerical Investigations of Endwall Flow in a Bowed Compressor Cascade, 41st AIAA/ASME/SAE/ASEE Joint Propulsion Conference & Exhibit, AIAA 2005-3638 (2005.7)
- 3) Y. Horiuchi, et al. : Improvement of Heat Transfer Performance of Turbulence Promoter Ribs, ASME GT2006-91168 (2006.5)
- 4) K. Hattori, et al. : Performance Assessment Study of a 250 MVA Air-cooled Turbo Generator, Electric Machines and Drives Conference 2003 IEMDC'03 IEEE International
- 5) T. Ishida : Feasible Study for the Availability of Electric Vehicles for the Stable Operation in Power System Network, EVTeC'11, SS-5-20117248 (2011.5)

執筆者紹介



瀬川 清

1990年日立製作所入社、日立研究所 蒸気タービン研究部 所属
現在、蒸気タービンの研究開発に従事
日本機械学会会員、ターボ機械協会会員



高橋 康雄

2000年日立製作所入社、日立研究所 ガスタービン研究部 所属
現在、ガスタービン圧縮機の研究開発に従事
日本ガスタービン学会会員



樋口 真一

1993年日立製作所入社、日立研究所 ガスタービン研究部 所属
現在、ガスタービン基本計画およびタービン翼研究開発に従事
日本ガスタービン学会会員、日本機械学会会員



羽江 隆光

2001年日立製作所入社、日立研究所 エネルギー・環境研究センター
電力流通研究部 所属
現在、回転電機の研究開発に従事



富田 泰志

1990年日立製作所入社、日立研究所 情報制御研究センター スマートシステム研究部 所属
現在、電力流通システムの研究開発に従事
電気学会会員、IEEE会員



西 高志

1984年日立製作所入社、電力システム社 新事業開発推進本部 研究開発企画部 所属
現在、電力・エネルギーシステムの研究開発企画に従事
工学博士
日本原子力学会会員、エネルギー・資源学会会員