

コンバインドサイクル発電プラントの動特性解析技術

Dynamic Simulation Technology for Combined Cycle Power System

森川 安貴
MORIKAWA Aki

白川 昌和
SHIRAKAWA Masakazu

保坂 俊二
HOSAKA Shunji

当社では、コンバインドサイクル発電プラント(以下、CCと略記)のエンジニアリングに動特性解析を活用して、機器設計及び運転/制御の最適化、試運転調整の効率化を実現している。解析に使用するモデルの作成には、当社の豊富な機器の製作実績を反映しており、解析結果の信頼性は高い。また、動特性解析の効率化と高度化のための技術開発に取り組み、エンジニアリングへすばやく反映するための環境も整っている。今後、CCの重要性がますます高まり、よりシステムが高度化していくなかで、動特性解析が果たす役割は大きい。

Toshiba utilizes dynamic simulation for the engineering of combined cycle power system, in order to perform optimum equipment and operation design and efficient plant commissioning. It is possible to accurately predict the dynamic behavior of a plant, since our simulation models are based on a large accumulation of power plant know-how. We also apply advanced simulation techniques to achieve expeditious engineering. Dynamic simulation will become even more important as the complexity of power plants continues to increase.

1 まえがき

CCは、一般に、電力システムの需給調整を行うミドル負荷として運用されるため、起動/停止時間の短縮や負荷追従性の向上が要求される。このため、プラント出力や熱効率だけでなく、起動/停止、負荷変化などの動特性を考えた設計/エンジニアリングが重要となっている。

当社では、動特性解析技術をプラント計画・設計・試運転での一連のエンジニアリングに活用しており、その概要と適用事例などについて述べる。

2 プラント動特性解析の概要

プラント動特性解析は、原動機、ポンプ、バルブなどの機器の動特性と、熱交換器や配管内の蒸気/水、排ガスなどの流れを数式化し、様々な運転状態をコンピュータで再現している。

動特性解析の対象となるCCの構成を図1に示す。CCは、ガスタービン(GT)と蒸気タービン(ST)の2種類の原動機から構成され、GTの高温排ガスを熱源として排熱回収ボイラ(HRSG)でSTを駆動する蒸気を発生している。GTの運転状態によってHRSGで発生する蒸気の状態(温度、圧力、流量)が変化するため、GTとSTを協調して運転しなければならない。このように、CCの運転は高度化しており、過渡的な機器の運転状態及び蒸気の状態などを正確に把握するには、動特性解析が不可欠である。

プラントのエンジニアリングの各段階と動特性解析のかか

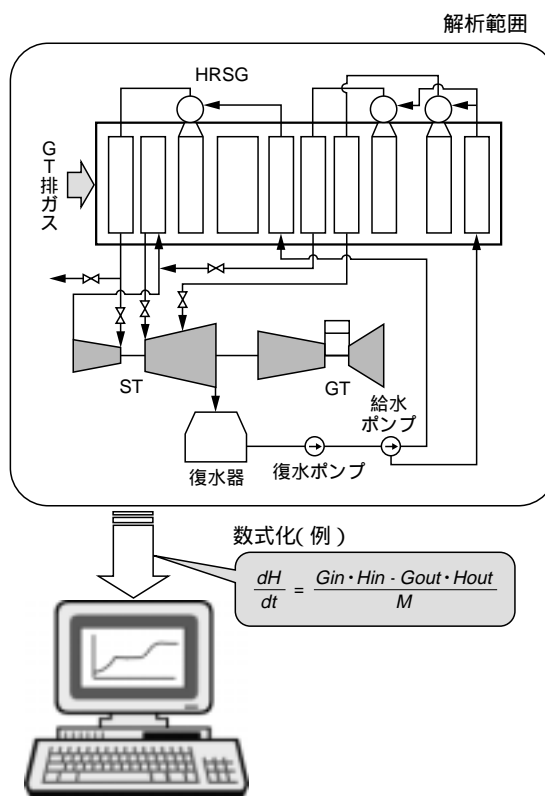


図1 . CCの構成と解析範囲 プラント全体が解析対象であり、これを数式化してコンピュータ内に再現する。

Combined cycle power system and scope of dynamic simulation

わりを図2に示す。図に示すように、計画から試運転までの全工程にわたって動特性解析が利用され、エンジニアリング

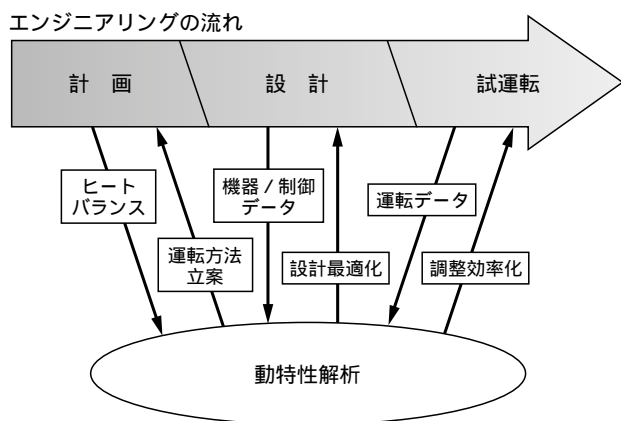


図2 エンジニアリングの段階と動特性解析 計画,設計,試運転の全工程にわたって,動特性解析が利用されている。

Engineering process utilizing dynamic simulation

にフィードバックされている。計画段階では,ヒートバランスや機器諸元などから作成した解析モデルで動特性解析を行い,起動/停止スケジュールなどを検討する。設計段階では,機器や制御システムの詳細データを解析モデルに反映し,機器仕様の確認や制御ロジックの健全性を評価する。試運転段階では,現地で実測されたデータを解析モデルに反映し,運転上の問題点などがあった場合は,動特性解析を利用して対策を検討する。このように,エンジニアリングの各段階で動特性解析を繰り返し実施して,プラントの最適設計が行われている。

動特性解析により検討される主な項目を表1に示す。また,プラントトリップや事故があった場合の各機器への影響の予測にも,プラント動特性解析を活用している。

表1 動特性解析における評価項目
Simulation items for combined cycle power system

運転ケース	主な評価項目
コールド起動 ウォーム起動 ホット起動	起動時間, ST 熱応力, HRSG 熱応力, プラント排出 NOx 量, ドラム水位変動, ST 冷却蒸気の確保
通常停止 ST 強制冷却停止 HRSG 強制冷却	停止所要時間, ST 熱応力, ドラム水位変動, プラント最終状態, ST 冷却蒸気の確保
所内単独運転 負荷遮断	蒸気系圧力変動, 復水・給水系流量変動, ドラム水位変動, ST 冷却蒸気の確保
負荷変化	負荷追従性, プラント排出 NOx 量, ST 熱応力, HRSG 熱応力

NOx: 窒素酸化物

3 適用事例

プラント動特性解析は,様々な目的で実施されている。ここでは,復水ポンプの最適設計のために実施した動特性解

析と,最新鋭の1,500 C級CCの動特性解析について述べる。

3.1 負荷遮断時の動特性解析

機器の最適設計の例として,復水ポンプ容量の検討のために実施した動特性解析について説明する。

復水ポンプは,その容量が小さすぎると過流量によってプラントトリップを引き起こす。逆に,大きすぎるとレイアウト上及びコスト上のデメリットが生ずる。

復水ポンプの容量は,運用上もっとも厳しい運転となる負荷遮断時の流量から決定する。負荷遮断が発生すると,復水器内の温度上昇を防ぐためのスプレ水が復水器へ流れる。同時に,ドラム水位は大きく変動する。復水ポンプ流量は,スプレ水とドラム給水流量の合計に等しい。復水ポンプの容量を決定するうえで,負荷遮断時のスプレ水とドラム給水流量の挙動を,正確に予測することが重要となる。図3は,負荷遮断時のスプレ水,ドラム給水,復水ポンプ流量の挙動を動特性解析で求めたものである。解析結果から,最適な復水ポンプの容量が求められる。

3.2 1,500 C級CCの動特性解析

1,500 C級CC(H System^{TM(注1)}(Hシステム): General

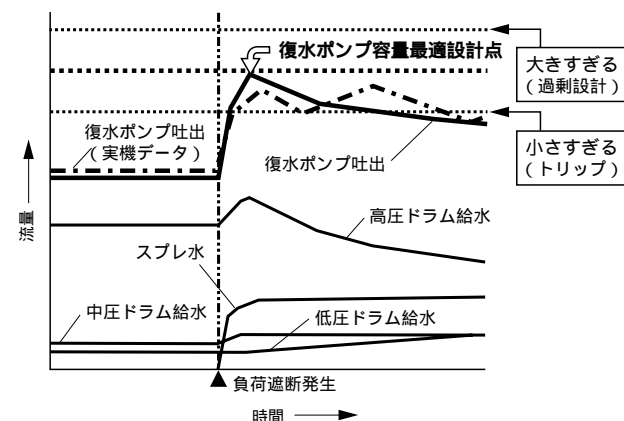
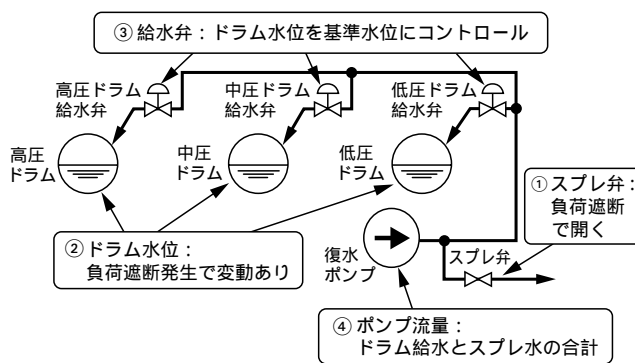


図3 復水ポンプ容量の最適設計 負荷遮断時のスプレ水とドラム給水流量の動的な挙動を把握することにより,適正な復水ポンプ容量を予測・決定している。

Condensate pump design by dynamic simulation

(注1) H Systemは,米国GE社の商標。

Electric(GE)社製 1,500 ℃級 H型 GT を用いた CC)では ,GT 入口温度の高温化のため ,GT 翼の冷却に ,従来の空気に代えて冷却特性が適した蒸気を用いる。従来と異なるプラント挙動が予想されるため ,動特性解析を用いて Hシステムの最適な系統設計と運転方法を検討している。以下に ,動特性解析における主な評価ポイントを示す。

- (1) GT 冷却蒸気の動特性 GT 翼を高温での劣化と損傷から保護するため ,起動 / 停止 , 負荷変化など ,あらゆる運転状態において ,計画どおりの GT 冷却蒸気(温度 , 圧力 , 流量)を供給できるか評価する。
- (2) 空気冷却 蒸気冷却の切替制御 GT 翼の冷却媒体として ,GT の圧縮空気と HRSG の発生蒸気が使用され ,運転状態に応じて切り換えられる。切換え時の GT 冷却媒体の温度差を評価する。
- (3) ST 起動 / 停止方法 GT 翼を HRSG の発生蒸気で冷却しながら ,ST の起動 / 停止を行う。ST 熱応力の設計条件を満たし ,かつ GT 冷却蒸気(温度 , 圧力 , 流量)を計画どおりに供給できるか評価する。
- (4) 配管合流部の温度差 GT 翼を冷却する蒸気の供給と回収系統には複数の配管合流部がある。合流する蒸気の過渡状態での温度差を評価して ,配管設計に反映する。

起動時の動特性解析による ,軸回転数 ,GT と ST 負荷 ,GT 冷却蒸気流量の挙動の例を図 4 に示す。GT 起動から低負荷まで ,GT 翼は GT の圧縮空気冷却される。HRSG から所定の蒸気が発生すると ,GT 翼の冷却は HRSG の発生蒸気に切り換えられる。ST 通気後 ,GT 翼冷却後の加熱された蒸気は ,ST の動力として回収される。GT 負荷が高くなるほど GT 翼が高熱化するため ,冷却に必要な蒸気流量も多くなる。GT 冷却蒸気の温度 ,圧力 ,流量 ,及び ST 熱応力などの ,解析結果を基に前述の (1)~(4) の評価をして ,最適な系統設計と運転方法を検討している。

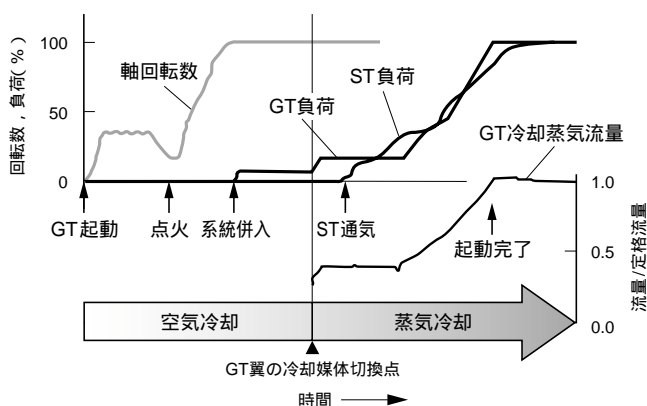


図 4 . 1,500 ℃級 CC(Hシステム)の動特性解析 GT 冷却蒸気を適切に供給できることを確認した。
Dynamic simulation of 1,500 ℃-class combined cycle power system

4 動特性解析の効率化と高度化

CC の需要増加と多様化により ,CC のエンジニアリングにおける動特性解析の重要性は高まるとともに頻度も急増している。このため ,動特性解析の効率化 ,高度化及びモデル作成を効率化するシステム開発と環境整備も行われている。ここでは ,動特性解析の効率化と高度化のための技術について述べる。

4.1 最適化手法を用いたプラント起動計画

従来は ,各種パラメータを経験的に変更し ,動特性解析を繰り返し実施することで ,系統構成や運転方法の最適化を検討してきた。このため ,一つの結論を出すために多くの時間と労力を要した。

近年 ,計算機の高速度に伴い ,動特性解析に最適化手法を組み合わせることが可能になり ,最適なプラント起動スケジュールを自動的に計算できるようになった。

この最適化手法を ,多軸型 CC のプラント起動計画に適用した例を図 5 に示す。ここでは ,運転制約条件は ST 熱応力 ,HRSG 熱応力 ,GT 最大負荷変化率とし ,起動時間が最短となる起動スケジュールを自動探索した。図 5 の例では ,ST 熱応力を制限値以下に抑えながら ,起動時間を短縮している。

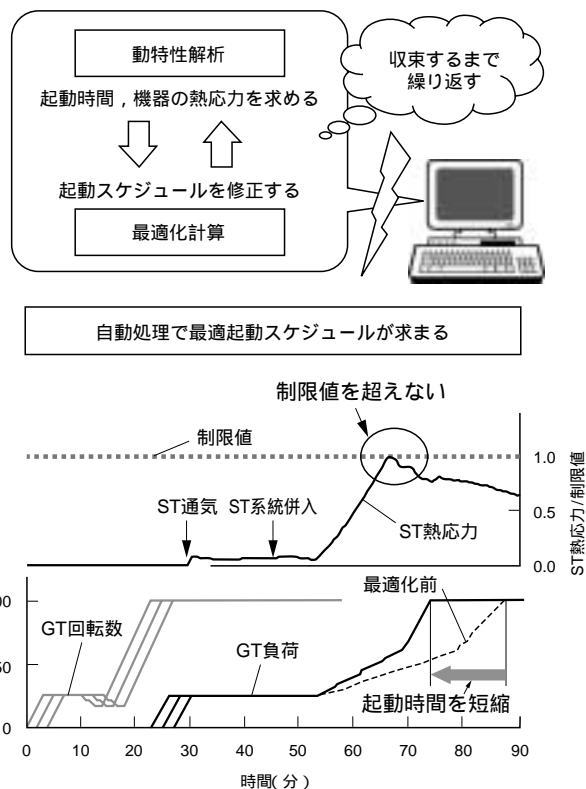


図 5 . 最適起動スケジュールの探索結果 ST 熱応力の設計条件を満たし ,起動時間が最短となる起動計画を策定できる。
Startup planning optimization method for multishaft combined cycle power system

4.2 解析モデル作成の効率化

従来は、解析モデルの作成や変更によくの時間を要していた。動特性解析を効率よく行うためには、解析モデルの作成時間の短縮が必要である。

現在は、プラントを構成する機器がGUI(Graphical User Interface)でモジュール化されている。GUIで作成した解析モデルの例を図6に示す。CCの構成機器を画面に置き、機器と機器とをマウス操作で結線することで解析モデルを作成できる。

GUIによるモデル化は、系統構成や制御ロジックを簡単に変更できるので、多様な解析ケースを扱うような場合に有効である。

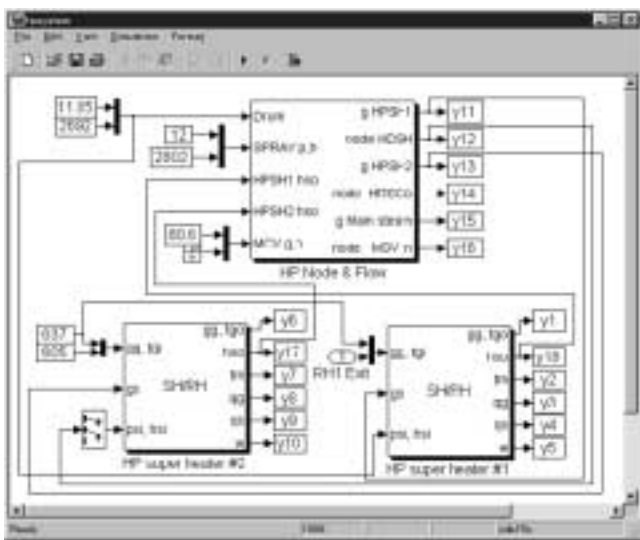


図6 . GUIを用いたモデリング 機器ごとに部品化を図っており、任意の部品を並べ、それらを線で結ぶことで、解析モデルを構築できる。
Typical dynamic simulation tool using GUI

4.3 現地実測データの評価とモデル反映の効率化

解析部門では、遠く離れた発電プラントの運転データをリアルタイムで監視するシステムを利用して、試運転中のプラントデータを評価している。遠隔監視システムを利用した試運転評価の概念を図7に示す。実機データをリアルタイムに収集できるので、問題となる事象を抽出するまでの時間が短縮できる。そのため、動特性解析を使ってタイムリーに評価結果・対策を報告できる。このように、新しい情報インフラを利用することで、動特性解析が効率よく試運転に反映されている。

5 あとがき

CCは発電効率の高さから、今後も電源の中核を成すもの

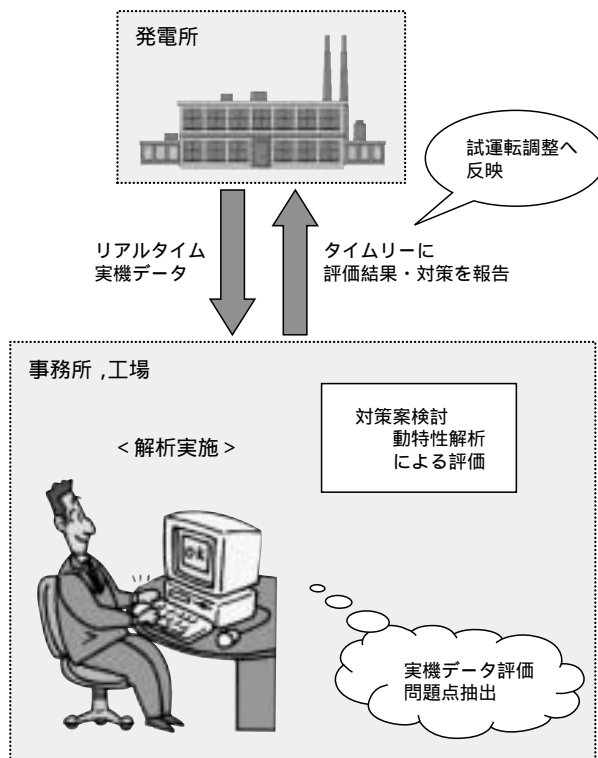


図7 . 遠隔監視システムを利用した動特性解析 試運転中の発電プラントデータをリアルタイムで解析部門に取り込むことで、試運転調整のスピードアップができる。

Application of remote monitoring system for dynamic simulation

と考えられている。また、1,500 C級CC(Hシステム)の実用化など、システム構成や規模の多様化も進むであろう。安定した電力供給に、CCの果たす役割は大きい。CCのシステム構成は高度化しており、機器の動特性を考えたシステム設計と運転方法の検討が重要になる。

当社は、動特性解析技術を設計/エンジニアリングに活用し、信頼性・安全性・環境性に優れ、かつ低コストを実現するCCシステムを提供していく。



森川 安貴 MORIKAWA Aki

電力システム社 火力事業部 火力開発技術部。発電プラントの動特性解析業務に従事。エネルギー・資源学会会員。
Thermal Power Systems & Services Div.



白川 昌和 SHIRAKAWA Masakazu

電力システム社 火力事業部 火力開発技術部。発電プラントの動特性解析業務に従事。日本機械学会会員。
Thermal Power Systems & Services Div.



保坂 俊二 HOSAKA Shunji

電力システム社 火力事業部 火力開発技術部。発電プラントの動特性解析業務に従事。
Thermal Power Systems & Services Div.