

動特性シミュレーションのプラント設計への適用

Dynamic Simulation in Process Plant Design

廣田 美晴 制御技術部 第一技術室 主査
阿瀬 始 制御技術部 統括スタッフ 工博
金尾 英司 エネルギーシステム技術部 統括スタッフ
清野 良 パイプラインシステム技術部 主査
宇根 浩 エネルギーシステム技術部 統括スタッフ

Yoshiharu Hirota
Hajime Ase
Eiji Kanao
Ryo Seino
Hiroshi Une

昨今の新規プロセスの適用を含めたプロセスプラント設計において、要求仕様の高度化・複雑化に伴い設計妥当性の早期検証、具体的設備性能の提示、最適設計に対する実証データ提示などが求められるケースが多い。この要求に対し、プラントの数値モデルを用いた動特性シミュレーションは、定量的な評価データを提供できることから有効な手法である。本稿では、当社エネルギー関連商品における実施例を紹介し、その有効性について述べる。

In recent process plant design work, many cases that quantitative dynamic estimations on the process behavior are needed to verify the optimal design and clarify the plant performance in early design stage can be found. For this demand, dynamic system simulations consisted of plant mathematical models will be effective method as it can offer such data. This paper describes some application cases using this approach for energy plant engineering projects in NKK and presents how this can offer effective data in engineering design stage.

1. はじめに

昨今のプラント設備設計においては、要求仕様の高度化・複雑化／設備計画最適化要求とともに、納期（設計期間／試運転期間）の短縮要求も高く、短期間で高精度で最適な設計が求められる。具体的には、基本計画時点での動的設備性能の定量的提示、プラント実運転前の設計妥当性確認、設備異常時プラント挙動の安全性確認などが設計業務の中で要求されるケースが少なくなく、設計結果としての設備動特性を実機製作の前段で確認することが必要になる。これに対応するには、実機のスケールモデルによるパイロットプラントを製作して運転データを採取する方法なども考えられるが、前述したように設備の早期立ち上げを要求されている状況では現実的ではなく、プラント構成要素の数値モデルに基づく精度の高い計算シミュレーション¹⁾による動特性把握へのニーズが高まっている。

一方で、計算機ハードウェア／ソフトウェアの飛躍的進歩を背景として、近年の各種シミュレーションツールの高度化／高機能化は著しく、計算シミュレーション実施に必要とされる開発期間／労力は従来に比べ半減しており、設計の一手法として納入設備の数値化モデルによる動特性シミュレーションを遂行することが可能となってきた。

本稿では、当社エネルギー関連設備設計における動特性シミュレーション適用事例を紹介し、設備設計における同手法適用の具体的展開および設計フィードバック結果の有

効性に関して報告する。

2. 動特性シミュレーションの設計業務展開

プラント設計業務におけるシミュレーション実施・動特性把握は一般的に Fig.1 に示すフローにより実施される。

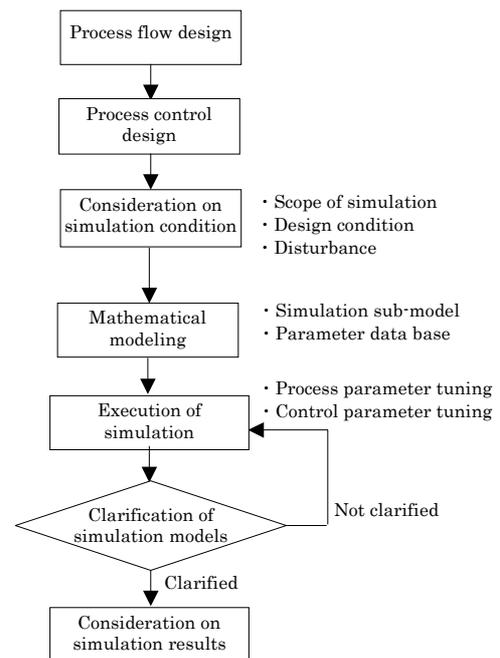


Fig.1 Simulation in plant design workflow

(1) プロセス・フローの決定と構成機器の選定

プラント要求仕様を実現するために必要となる設備構成が具体的に基本計画される。ここでは、各機器の仕様がプロセス条件に基づき静的に設計され、要求設備能力を満たし、マス・バランス、ヒート・バランスなどが考慮された機器構成が確立される。

(2) プロセス制御設計

確立されたプロセス・フロー上のプロセス状態変数に対し、要求仕様に基づく定性的な制御系設計を行い、設備全体の基本計画が完了する。

(3) シミュレーション実施条件の抽出

対象設備の要求仕様を基に動特性確認が必要となる設備状態を抽出し、シミュレーション実施条件を具体的な数値として設定する。これには設備設計パラメータや負荷変動などの外乱条件を含むものとなる。

(4) プロセス数値モデルの作成

前項までで計画されたプロセス・フローに対し動特性確認を目的とした数値シミュレーションを実施することになる。まず、全体プロセスを構成する各機器要素の動特性を表現した数値モデルを作成する。この段階で実設備では計測（監視）されない項目を含めて必要な状態変数を定義する。多くの場合プロセス数値モデルは機器単位にサブモデル（モジュール）化し開発可能であり、全体モデルはこのサブモデルの入出力結合により実現できる。個々のモジュールの動特性確認は比較的容易であり、共通機器についてはデータベース蓄積も有効な手段となるため、開発効率の向上とともに全体モデルの確実な構築が可能となっている。

(5) 全体シミュレーション実施

構築された数値モデルに対し実施条件を入力設定し、シミュレーション計算を実施する。動特性検討に対する実施条件は検討対象から選定されるが、シミュレーション実施時には制御パラメータを代表とする多くのチューニング要素についても同時に検討する必要がある。

(6) シミュレーション・モデル妥当性検証

すべての構成モデルの動特性確認がなされている場合を除き、シミュレーション結果の妥当性確認のために実運転データとの突き合わせによる構築モデルの妥当性検証が必要となる。この検証には、類似設備あるいは比較的マイルドな運転状態での運転データが使用されるケースが多い。ここで実機データなどとの差異がある場合には、動特性に寄与するモデルパラメータの再チューニングおよび実施条件での再シミュレーション実施が必要となる。

(7) シミュレーション結果に対する検討とまとめ

得られたシミュレーション結果に演算加工などを施し、検討内容に即した結果提示を行う。近年のソフトウェア環境ではシミュレーションツール自体に各種ツールが用意されており、グラフィカルな提示が容易に行えるようになってきている。

3. 動特性シミュレーション実施例

本章では、当社エネルギープラント商品における動特性シミュレーションの適用例を紹介し、設計業務展開上どのように機能しているかについて報告する。

3.1 発電用燃料ガス供給減圧加温設備の制御性検討

3.1.1 設備概要とシミュレーション条件

近年の発電用燃料ガス輸送ガス導管の高効率運用を目的とした高圧化に対応し、当社では、高圧ガス導管から既設／新設発電設備への供給圧力温度を調整する減圧加温設備（以下、減圧設備と略記する）を納入している。全体システム（Fig.2 参照）で考えると、LNG 供給元になる LNG 基地～高圧ガス導管～減圧加温設備～発電設備と納入ベンダーを含めて複合的なシステムとなっており、減圧設備への要求仕様は隣接他設備（ガス導管／発電設備）との境界条件仕様の形で与えられ、かなり厳しいものとなっている。また、減圧設備にとって外乱となるガス導管ガス流量による減圧設備着圧力変動と発電設備側の燃料ガス消費量も異常時を含めると非常に大きく、制御対象（圧力・温度）への影響の抑え込みが検討課題となる。

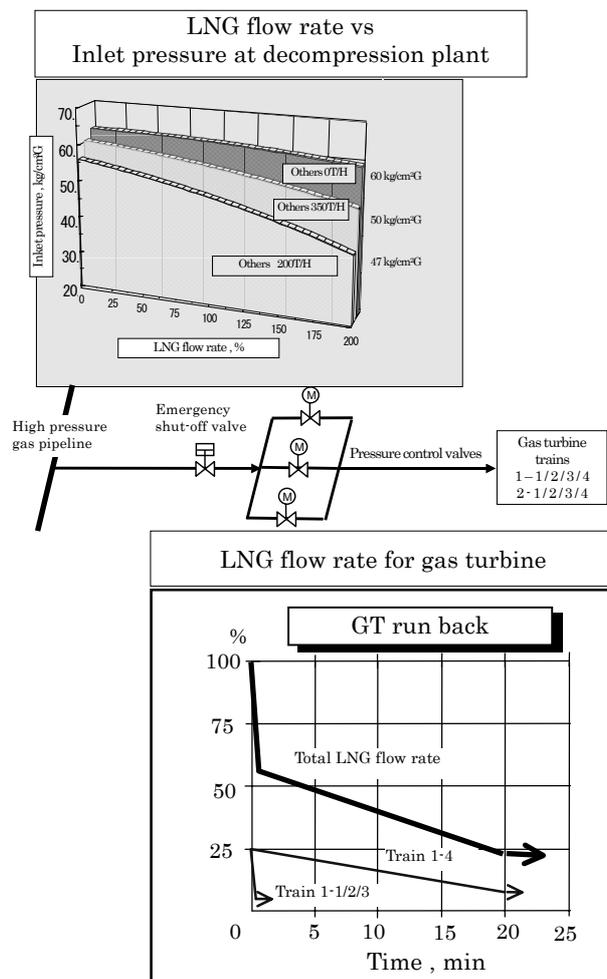


Fig.2 Overview of LNG decompression facility

3.1.2 動特性シミュレーション実施背景

本設備設計段階における動特性シミュレーション検討が必要とされた理由は以下のものである。

(1) 採用制御方策の妥当性検証

高精度な圧力制御を実現するために導入した制御ロジックのパラメータ調整を含めた妥当性確認が必要であった。

(2) 設備早期立ち上げ

設備全系としてマルチベンダの複合システムとなっており、発電設備試運転には減圧設備からの正常なガス供給が必要、逆に減圧設備試運転には発電設備ガス消費が必要であり、設備試運転即正常運転開始という条件が求められる。

(3) 考慮されるべき外乱条件での試験実施が困難

負荷変動追従性能の確認には発電設備側の異常時を含めた確認が必要となるが、異常発生時の他運転設備への影響が大きく、試験自体が実施できないケースがある。

3.1.3 動特性シミュレーション実施結果

シミュレーション結果例として、設備異常時（発電設備負荷緊急抑制時）の圧力制御結果を Fig.3 に示す。このような具体的なトレンドイメージにより、想定される最大負荷変化時においても、圧力変動を許容圧力変動以内に抑えられることがわかる。また、PI 制御パラメータなど試運転時に調整すべき項目の多くの部分の事前調整が安全に可能となり、試運転業務負荷の確実な低減に繋がっている。

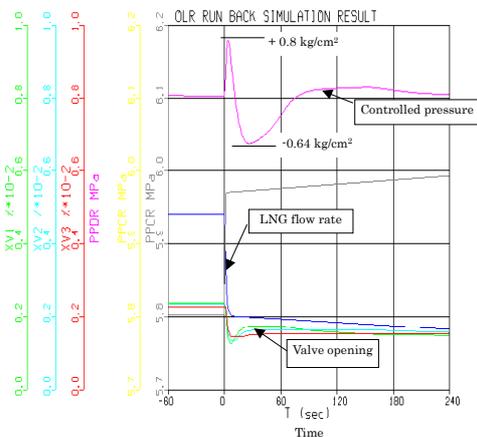


Fig.3 Example of simulation result

また、数値モデル²⁾の妥当性を含めたシミュレーション結果精度の検証には、実施可能な実運転データと同条件にて実施したシミュレーション結果との突き合わせ確認を行い、有効性を確認している。Table 1 に示すように、小規模負荷変動（ガスタービン 1 軸：1-4 軸および 2-1 軸 負荷遮断）時の圧力変化について、試運転データとシミュレーション結果が良く一致していることから、同モデルを用いたシミュレーション全般の有効性を確認している。

3.2 都市ガス製造熱量調整設備基本計画への適用

3.2.1 設備概要と数値モデルの構築

都市ガス製造における熱量調整設備に対して動特性シ

Table 1 Clarification results of simulation

Clarification case		Maximum pressure (kg/cm ²)	Minimum pressure (kg/cm ²)	Time for max. press. (sec)
Train 1-4 runback	Simulation error	0.03	0.01	1
Train 2-1 runback	Simulation error	0.04	0.01	0

シミュレーションを実施した例を紹介する。熱量調整設備の基本構成を Fig.4 に示す。熱量調整は、LNG 気化ガスである NG と LNG 受入時に発生する軽質気化ガス（BOG：Boil off Gas）の混合ガスに対し、高熱量を持つ LPG ガスを混合器内に添加することで、都市ガス（13A）所定熱量 46.05MJ/Nm³ を持ったガスを製造する。一般的に熱量制御は、NG 熱量/流量および BOG 熱量/流量の計測に基づくフィードフォワード制御を主体に行われている。

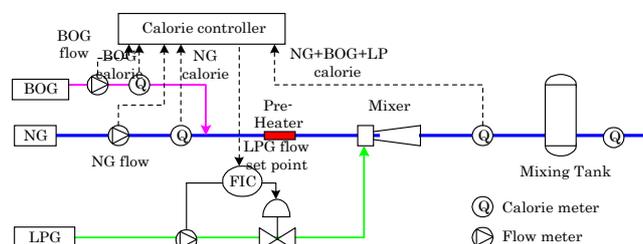


Fig.4 13A Gas calorie control system

上記熱量調整設備を機器ブロックごとに数値モデル化した場合のフローダイアグラムを Fig.5 に示す。

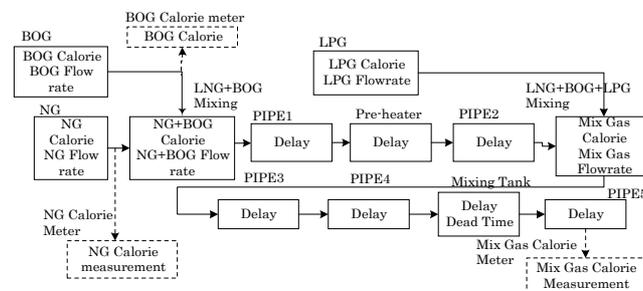


Fig.5 Block diagram of simulation model

ここでは、配管、弁類などの数値モデルが比較的作成しやすい機器とともに、ミキシングタンクのように数値モデル化に際し定量化が難しい機器が含まれており、全体精度を確保する上で検討が必要である。本例の場合には、先行類似工事にて納入したミキシングタンクの実運転データに基づき数値モデルパラメータをチューニングすることにより基本モデルを作成し、設計値を実設計から取り、採用数値モデルとした。実際の業務フローは以下のものである。

- (1) 類似先行工事システム構成 → 数値モデル構築
- (2) 先行工事 実データ → ミキシング過程パラメータ
- (3) 設備全体の数値モデル作成 (Fig.5 参照)
- (4) 検討項目ごとにシミュレーションの実施
- (5) シミュレーション結果の評価

3.2.2 動特性 検討・確認項目

本設備では、以下が確認・検討項目として挙げられた。

- (1) 熱量計測遅れの熱量調節への影響
- (2) 気化器停止後（停電停止を含む）の再立ち上げ時挙動
- (3) LNG 受入時（BOG 発生量増大）挙動
- (4) ミキシングタンク容量の決定

プロセス条件／運転条件を含めて、検討項目ごとに該当する数値モデルパラメータを変更しつつシミュレーション結果による確認および比較検討を行い、最終設備設計仕様決定に関して定量的な評価を与えることができた。

3.3 LNG 受入輸送方法に関する基本検討

3.3.1 計画概要と検討課題

LNG 基地における通常の LNG 受入は、LNG 船に搭載されている複数のカーゴポンプにより基地側の LNG タンクに送り出され行われるが、今回対象となった計画の場合、受入バースから LNG 基地までの距離があるため受入配管が長大となり、かつレベル差があるために受入ライン上にバッファタンクおよびブースタポンプを設置した受入方式の採用を検討することになった。受入設備の概略フローを Fig.6 に示す。

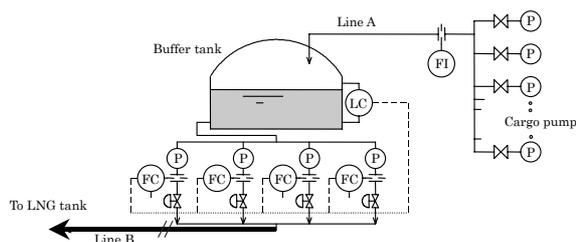


Fig.6 LNG receiving flow with booster pump

この方式の LNG 基地での実施例は世界的にも少なく、LNG 船カーゴポンプの台数変更操作による送出量変動に対して、安定した受入が可能となる設備仕様の検討を実施した。主な検討課題は以下のものであり、おのおの項目は相互に関連している。

(1) ブースタポンプ制御方策の基本検討

カーゴポンプの台数変更操作は送り出し圧力を制御幅内に収めるよう行われ、それにより送出流量も段階的に変動する。これに対しブースタポンプ部での制御は、バッファタンク内圧力あるいはレベルを一定に保つよう、複数台のブースタポンプの台数制御／流量制御を行うものとなる。この制御方策の妥当性を検証した。

(2) バッファタンク容積の最適化

バッファタンク容積による上記バッファタンク内圧力／レベル挙動を定量的に把握し、設備上必要とされるタンク容積の計画値を決定する。

(3) バッファタンク設計圧力の検討

動的な運転状態をシミュレートすることにより、バッファタンク内圧力変動の最大値を定量的に把握し、タンク設計圧力決定の参考値とする。

3.3.2 シミュレーション実施と結果

本シミュレーションでは、上記カーゴポンプ動作、配管／バッファタンクおよびブースタポンプ部制御系をモデル化し、カーゴポンプ動作を外乱とするバッファタンク圧力／レベル挙動動特性データについて各設計パラメータを変更しつつ採取した。Table 2 にシミュレーション結果の一例を示す。

Table 2 Simulation results for buffer tank size

Buffer tank volume (kL)	LNG level maximum error in buffer tank (m)	Tank pressure maximum error (mmAq)	Design pressure for Buffer tank (mmAq)	Maximum tank pressure (mmAq)
1000	0.732	3474	10422	4809
5000	0.467	1006	3018	3069
10000	0.368	500	1500	2730

Table 2 に示すように各バッファタンク容量に対し受入作業をシミュレートした結果、バッファタンク内 LNG レベルおよび圧力の最大制御偏差および最大到達圧力を得ている。本例では一例として、得られた最大圧力偏差の3倍を設計圧力値の目安とし、最大到達圧力との適合性を考慮し、バッファタンク容積の適正值を5000kLとしたケースを示している。このように、設備の基本計画時点においても設備の動的挙動を定量的に把握し、設備仕様に反映可能できることは、設備ミニマム化などの最適設計への有効な手段となっている。

4. おわりに

本稿では、動特性シミュレーションをプラント設備の計画設計時に適用し、動的な設備性能を定量的に把握することにより得られる設備仕様検討の例について紹介し、そのエンジニアリングフローを含めた業務内容について報告した。その中では、計画設計時において動特性シミュレーションを実施することにより、十分な精度が確保された最終設備完成後の設備性能予測を確認しつつ、制御パラメータ詳細検討あるいは静特性的に設計できない機器設計仕様決定などが適用結果として得られている。

今後さらに高機能化が求められる広い商品分野において、当社の商品付加価値をさらに向上するために、上記特質を生かした業務展開を行っていきたいと考えている。

参考文献

- 1) ヒンメルブラウほか、プロセス解析計算法. 培風館(1971).
- 2) 谷内ほか、非線形波動. 岩波書店 (1977).

<問い合わせ先>

制御技術部 第一技術室

Tel. 045 (505) 7735 廣田 美晴

E-mail address : hirotay@eng.tsurumi.nkk.co.jp