

電力プラントの動的解析および制御に関する研究

長崎大学大学院生産科学研究科 松井信正

近年の燃料費の高騰と燃焼時の CO_2 排出は深刻な社会問題となっている。そこで、化石燃料の使用量を削減することは緊急の課題となっている。

産業設備において、特に化石燃料の使用量が大きい火力発電所や大型の商船などの電力プラントの割合は世界的に高く、また将来的にもその割合は高いことが予測されている。従って、これらの電力プラントのプラント効率を改善して燃料の使用量を削減することは CO_2 の排出抑制のために非常に有効な手段である。

火力発電所や大型の商船は原動機で構成されており、それらに付随する電動機や発電機などの回転運動系の機器を有効に動作させることがプラント効率の向上にはかかせない要素となっている。これらの運用においては、定常状態だけでなく、起動時および異常時においても安全に運転させることが望まれる。しかし、起動や停止時および異常発生時にプラント全体に及ぼす影響は十分に把握されていないのが現状であり、そのために安全係数を過大に課し、コストの上昇やプラントの効率低下および燃料の使用量の増加につながっている。

効果的に安全係数の評価をするためには、シミュレーションによって起動や停止および異常時のプラント全体の動特性の把握および問題点を明らかにすることが有効である。しかし、プラント全体をモデル化することは容易ではなく、さらに、検討する範囲が通常の運転状態だけでなく、起動や停止および異常時の流量、圧力、温度および回転数などの動特性を幅広く把握することは非常に難しい。従来、プラント全体をモデル化する手法として、定常領域を線形化したシミュレーションが提案されているが、線形化されたモデルでは、シミュレーションの運転範囲が限定されるため不十分である。そこで、これらの要求に応えるためには、対象とするプラントの機器の構成を厳密にモデル化する非線形モデルによるシミュレーションを行う必要がある。

これらを背景として、本研究では、まず、プラント全体の非線形モデルの構築手法を提案する。その手法によりプラント全体のモデルを厳密に構築し、電力プラントのプラント効率の改善に適用される回転運動系の機器の動特性の把握および問題点を明らかにする。次に、問題点に対する改善方法の提案を行い、実プラントや試験機での実証試験によりモデルを評価する。さらに、実測値からシステム同定の処理を用いて回転運動系の機器のモデルのパラメータを推定してモデルの精度向上を図り、システムの制御方式の改善を提案する。

その対象として、火力発電所および大型の商船におけるプラント効率の改善に適用する回転運動系の機器を挙げる。まず、火力発電所における回転運動系の機器による改善として、ポンプなどの電動機だけでなく、電力使用量が $1000\sim 3000\text{ kW}$ と非常に大きい大型の通風機の電源をインバータ化することが有効とされており、40%ほどのプラント効率に対して1台導入する毎に0.2%程度の効率改善が期待される。これらの大型の通風機には、押込み通風機、誘引通風機および脱硫通風機があり、同一プラント内で単一または複数の通風機が組合わされて動作している。インバータ電源は、一般的に運用が容易な誘引通風機もしくは脱硫通風機に適用されている。これは、押込み通風機は火炉の燃焼用空気を送風する通風機であり燃焼に直接影響を及ぼすため運用が難しく、適用が避けられてきたからである。そこで、更なるプラント効率の向上のためには、残りの押込み通風機にインバータ電源を適用する必要がある。しかし、

適用するインバータに異常が発生した場合の押込み通風機がプラント全体に与える影響は把握されていない。シミュレーションの結果、インバータ電源の異常時に燃焼空気が急激に減少することで火炉内の残存酸素が零となり、炉内爆発に至る可能性があることを明らかにした。また、その改善策として、従来のインバータ電源を使用した空気流量制御に先行制御を適用する方式を提案し、部分負荷から定格負荷まで改善できることを示した。提案した新しい制御方式を実プラントで実証し、安全で安定した運用が図れることを確認した。試験での実測値とシミュレーション結果の誤差は2%以下であり、ISA(Instruments Society of America)の規格で定義する誤差10%以下を十分満足する結果を得ている。さらに、異常によってインバータ電源から商用電源に切替る時間を0.5秒程度とする必要があることが分かり、その結果を受けて回転軸の安全係数を考慮して、最終的に0.55秒で切り替えることが決定された。また、プラント全体の耐圧などの安全係数が再検討され、補強などの追加のコストは不要であることが分かった。

次に、大型の商船における回転運動系の機器による改善では、2ストローク大型ディーゼルエンジンの排ガスを抽気して動力を得るコージェネレーションシステムとしてパワータービン発電機が有効であることが確認されており、50%程度のプラント効率に対して1.5%の大幅な効率の向上が見込まれている。しかし、パワータービン発電機の起動時および異常時の動特性は十分に把握されていない。シミュレーションの結果、最も厳しい負荷遮断時には、弁の操作のみで回転数の上昇を抑えることは難しいが、システムにロードバンクを用いることで抑制できることを示した。また、起動時にロードバンクを併用する新しい起動シーケンスを提案し、回転数のオーバーシュートが抑えられることを明らかにした。その結果、プラント全体の安全係数に影響を与えない有効な機器の数および配置が明らかになり、また効果的なコストの試算が可能となった。シミュレーション結果を基に作製した試験機の実測値とシミュレーション値の誤差は2%以下であり、良好な結果を得た。さらに、試験機で得た実測値からシステム同定の処理を用いて回転運動系機器のモデルパラメータを推定した結果、実測値とシミュレーション値の誤差は0.23%まで改善され、非常に高い精度を実現し、そのパラメータを用いたシステムの制御方式の改善を提案した。

これらの結果に基づいた安全係数およびコスト削減の絞込みにより、電力プラントにおいては、電動機や発電機などの回転運動系の機器を有効に動作させることによって、プラント効率の向上および燃料の使用量の削減、さらにはCO₂排出の抑制が実現できることが分かった。

本論文は、第1章から第6章で構成され、以下に各章の概要を示す。

第1章では、本論文の概要を示す。まず、本研究を行うに至った背景および問題点を明らかにする。次に、従来の研究を展望して本研究の位置付けを行う。

第2章では、プラント全体を厳密モデル化するための構造を示し、ヤコビアン行列による圧力と流量分布、物質収支および伝熱のモデル化とその計算手法について述べる。

第3章では、第2章で示すモデルを用いて、火力発電所の効率改善のために適用する回転運動系機器の異常発生時の解析および制御の改善について検討する。

第4章では、第2章で示すモデルを基に、大型の商船のプラント効率改善に適用される回転運動系機器の起動時および異常時の動的解析と制御方法の向上について考察する。

第5章では、第4章で検討した回転運動系機器の試験機の実測値を用いてシステム同定の処理を行いモデルの精度向上について明らかにする。さらに、同定手法によって得られる物理パラメータを用いて制御方式の改善方法を提案する。

第6章では、以上の成果を総括し、ここで提案する制御方法の実用化に向けた今後の課題にふれて結論とする。