九州大学学術情報リポジトリ
Kyushu University Institutional Repository

ガスタービンコンバインドサイクル発電プラントの高速起動技術に関する研究

吉田，泰浩

https://hdl.handle.net/2324/4110490

出版情報：Kyushu University, 2020, 博士（工学）, 課程博士
バージョン：
権利関係：

（様式２）

氏　　名　：吉田　泰浩

論 文 名　：ガスタービンコンバインドサイクル発電プラントの
高速起動技術に関する研究

区　　分　：甲

論　文　内　容　の　要　旨

気候変動の主要因とされる CO2 の排出削減が重要な社会課題となっており、エネルギー分野では風力発電や太陽光発電を中心とした再生可能エネルギーの導入やこの技術開発が進められている。この再生可能エネルギーの発電量の変動に対応するため、一日前までに電力の売電取引が成立する従来の前日市場に加え､当日の需給数時間前に取引が成立する時間前市場が世界的に拡大している。こうした売電取引を有利に進めるため、ガスタービン、排熱回収ボイラ、蒸気タービンの組み合わせから構成されるコンバインドサイクル発電プラントには､より短時間での起動が要求されている。

そこで本研究では、コンバインドサイクルの起動時間短縮を目的に、予測制御に基づくプラントの起動制御技術と、多目的最適化による起動曲線生成技術を開発した。

第１章では、本研究の背景と目的について述べ、本研究の意義と方針を示した。

第２章では、コンバインドサイクルの起動時間短縮に向けて、起動時の制約条件の１つである蒸気タービンロータ熱応力を予測計算し、この予測結果に基づきガスタービンと蒸気タービンを協調制御する方式を開発した。本方式では、蒸気タービンロータのメタル温度の上昇度合いに応じて起動過程を前後半に二分割し、起動前半では蒸気タービンの回転数・出力を操作して蒸気流量を調整し、起動後半ではガスタービン出力を操作して蒸気温度を調整することで、熱応力の蒸気温度や蒸気流量に対する感度に合わせて操作項目を切り替えることを特徴としている。開発した制御方式の効果を検証するため、多軸式コンバインドサイクルを対象にシミュレーションを実施し、以下の結論を得た。

・ガスタービン負荷や蒸気タービン回転数・負荷などのプラント操作量を入力として蒸気タービンロータ熱応力を計算する動特性シミュレータを開発した。既設プラントにおける蒸気の温度と圧力の最大誤差はそれぞれ 2.3%，4.9%と実機応答を再現し，開発したシミュレータを熱応力の予測計算に適用可能であることを確認した。

・開発した協調制御方式を HOT 起動、WARM 起動、COLD 起動の異なる初期メタル温度の条件に適用し、熱応力が制限値以下に安定的に制御されることを確認した。

・熱応力の予測計算に基づき蒸気タービンのみを制御したケースと比較して、開発したガスタービン・蒸気タービン協調制御方式では起動時間を最大 28%削減した。

第３章では、起動時間短縮に加え、寿命消費量や燃料消費量の低減など、多様化する顧客要望に対応するため、多目的進化的アルゴリズムを用いてプラントの起動方法を最適化する技術を開発した。本技術では、最適化プログラムによるガスタービン負荷変化率や蒸気加減弁開度レートなどの起動パラメータ値の探索と、動特性シミュレータによる目的関数の評価を繰り返すことで最適な起動曲線を自動生成する。本研究では、最適化過程において計算された解から隣り合う距離の近いも

のを排除することで多様性を維持して広範囲に広がる解を得ることができる NSGA-Ⅱを起動パラメータ値の探索手法に用いた。開発した多目的進化的アルゴリズムによる起動曲線の生成機能と、生成された起動曲線の妥当性の検証を目的に、一軸式コンバインドサイクルを対象に起動時間とロータ熱応力(寿命消費量)を目的関数とした起動曲線を試作し以下の結論を得た。

・蒸気タービンの起動時間と寿命消費量のトレードオフ関係を示すパレートフロント上に起動曲線を複数自動で生成できることを確認した。パレートフロントを可視化して解全体の分布を把握することで、起動曲線を対話的に選定できる見通しを得た。

・起動時間と寿命消費のどちらを優先するかに応じて、ガスタービン負荷と蒸気加減弁開度の最適な起動順序が異なるという知見を得た。

・停止後経過時間に対する起動時間と寿命消費量のパレートフロントの曲面が連続的となることを確認し、任意の起動初期条件と発電事業者からの要望に基づく最適な起動曲線を一意に選定できる見通しを得た。

第４章では、第３章で開発した起動曲線の最適化技術による起動プロセスの運用改善効果を検証するため、欧州の商用プラントにて起動試験を実施した。対象プラントの構成や起動制御方式に合わせて動特性シミュレータを構築、および最適化する起動パラメータを選定し、顧客要望である起動時の燃料消費量の低減を目的関数として起動曲線を生成した。生成した起動曲線を実機に適用し、以下の結論を得た。

・構築した動特性シミュレータにより計算された蒸気温度、蒸気流量、蒸気圧力の応答はそれぞれ計測値とよく一致し、制約条件である蒸気タービンロータ熱応力のピーク値の差は 1.8%であった。このことから、構築シミュレータを対象プラントの起動曲線生成に適用可能であることを確認した。

・生成された起動曲線では、過去の運転実績と比較して軸出力や蒸気加減弁の変化率を上昇させたことで起動時間が短縮した。また蒸気タービン出力上昇が早められ、蒸気タービン通気後のガスタービン出力の低下速度が増加した。これら起動時間の短縮とガスタービン負荷の低減により、過去の運転実績と比較して起動に要する燃料消費量を 22.8%削減する効果を得た。

第５章では、従来の起動モードを排して初期メタル温度に応じてプラントを最速で起動するモードレス起動を実現する制御技術を開発した。本技術では、第３章、第４章で開発した最適化手法を拡張して、初期メタル温度と起動時間を目的関数として探索された起動パラメータに基づき、初期メタル温度に応じた起動パラメータのパラメータ線図を作成し、このパラメータ線図を起動のたびに参照することで起動曲線を作成する。開発方式の妥当性を検証するため、第４章の実機試験で対象としたプラントについて最適化計算を実施し、以下の結論を得た。

・初期メタル温度と起動時間のトレードオフ関係において、モードレス起動の特徴を示すパレートフロント上に起動曲線群を網羅的に生成できることを確認した。

・初期メタル温度と起動パラメータ値の関係から成るパラメータ線図に基づき生成した起動曲線により、熱応力が合理的に制限値を満足するよう制御され、また初期メタル温度の上昇に応じて起動時間連続的に短縮するような起動曲線が生成できた。

第６章では、本研究で得られた成果を総括した。