

# 火力発電プラントの熱応力予測によるタービン最適起動技術

Optimal Turbine Startup Methodology Based on Thermal Stress Prediction

松本 茂 薬師 宏治 北口 典昭

■ MATSUMOTO Shigeru ■ YAKUSHI Koji ■ KITAGUCHI Noriaki

発電用蒸気タービンの起動時間を短縮することは、電力需要の変化に対する即応力の改善だけでなく環境負荷や燃料コストの低減にも貢献する。その一方で、タービンロータに生ずる熱応力が制限範囲内に抑えられるように適正な起動スケジュールで運用する必要がある。

この課題を解決するため東芝は、運転状態から将来の熱応力を逐次予測して起動スケジュールをリアルタイムに修正することで、熱応力を制限範囲に抑えながら起動時間を効果的に短縮する熱応力予測最適起動制御アルゴリズムを開発した。

Shortening of the startup time of a steam turbine generator contributes not only to increased flexibility with respect to demand from the electricity grid, but also to reductions in the environmental burden and fuel costs. However, it is necessary for the turbine to operate under a proper startup schedule in order to control the rotor thermal stress to within the designed limit.

Toshiba has developed a control methodology that can shorten the startup time by continuously monitoring the operating conditions, predicting future thermal stress, and performing real-time correction of the startup schedule so that the thermal stress is controlled to just below the limit.

## 1 まえがき

従来、火力発電プラントにおける蒸気タービンの起動制御は、タービン起動時点の高圧タービン第一段の蒸気温度とロータ表面のメタル温度との差（ミスマッチ温度）をミスマッチチャートと呼ぶ線図に照らして、タービン回転速度や発電機出力の適切な増加率、回転数保持時間あるいは出力保持時間などの運転パターンをチャートからあらかじめ読みとっておき、これに従って起動プロセスを順次進行させて定格出力に到達する方法が用いられている。この起動方法では、タービン起動途中の変動要因も考慮してタービンロータに発生する熱応力の予測値が制限範囲に入るよう、十分余裕を持ったスケジュールが選択されるようになっている。

一方、特に海外のコンバインドサイクル発電プラントでは、次の観点からプラント起動時間の短縮が強く求められている。

- (1) 環境調和 起動過程での中間出力領域を短時間で通過させ、窒素酸化物（NO<sub>x</sub>）の排出が低量となる定格出力状態まで迅速に移行すること
- (2) 電力市場取引での利益拡大 電力の市場取引が一般化している運用環境で、プラントを待機状態からすばやく起動して出力上昇させること
- (3) 長時間停止後の迅速な起動 数時間を要するコールド状態からの起動過程を短縮し、燃料コスト削減と発電運用への早期復帰に寄与すること

熱応力を制限範囲に抑えつつ起動時間を短縮する制御方法を検討するうえで、実運用の面から考慮すべき点としては、

ボイラ特性などの外的要因により起動操作の途中で運用条件が変化することが挙げられる。そこで、運用条件の変化に適応するために、蒸気や熱応力の状態を起動過程に沿ってモニタリングしながら細かく制御することが重要になる。

この課題に対して東芝は、タービン起動の全過程にわたってロータの熱伝達率の推移を逐次予測し、速度上昇率と出力上昇率、回転数保持時間、出力保持時間をリアルタイムに修正することによって起動途中の変動要因の影響を回避し、熱応力を制限範囲に抑えながら起動時間が最短となる熱応力予測最適起動制御アルゴリズムを開発した。北米のコンバインドサイクル発電所に適用してその効果を確認した。

## 2 タービンロータの熱応力

高圧タービンに高温高圧の蒸気が流入することで、ロータ内外面の温度分布不均衡に起因した熱応力が発生する。ロータに発生する熱応力は、高圧タービン第一段のシェルでのメタル温度（第一段メタル温度  $T_{\text{met}}(k)$ ,  $k$ : 時刻）の時系列変化から、ロータ内部の温度分布を推定して計算することで算出する。ロータを無限円筒として半径方向に分割した有限要素モデルを用いて、ロータ表面熱応力  $\sigma(k)$  は次式の状態空間モデルで記述できる。

$$\mathbf{x}(k) = \mathbf{A} \mathbf{x}(k-1) + \mathbf{B} \Delta T_{\text{met}}(k) \quad (1)$$

$$\sigma(k) = \mathbf{C} \mathbf{x}(k) \quad (2)$$

$\mathbf{x}(k)$ : ロータ半径方向温度分布ベクトル

$$\Delta T_{met}(k) = T_{met}(k) - T_{met}(k-1)$$

A, B, C : ロータ熱応力特性にかかわる定数行列

$\sigma(k)$  は、タービン起動過程でのロータの寿命消費を適正にするため制限値内に抑えることが求められる。

### 3 ミスマッチチャートによる起動方法

従来行われているミスマッチチャートによるタービン起動の例を図1に示す。タービン起動前にミスマッチ温度がミスマッチチャートと比較され、タービンの回転速度上昇率又は発電機出力上昇率が一意に決定される。また、回転速度や発電機出力を一定状態で保持する、いわゆるヒートソークの時間も決定される。これらのパラメータはタービン起動前に一度決定されると、起動開始後に生じる運用環境の変動、例えばタービン入口蒸気の状態などが変動しても、その影響を起動パターンに反映することができない。したがってミスマッチチャートによる起動では、そのような変動要因による影響を考慮して十分な余裕を持った起動スケジュールが選択されるようになっており、時としてロータ熱応力の制限値を大幅に下回った起動が行われる場合がある。

なお、熱応力が制限値を上回る場合に発電機出力を一時的に保持する出力保持機能は、従来から導入されている。

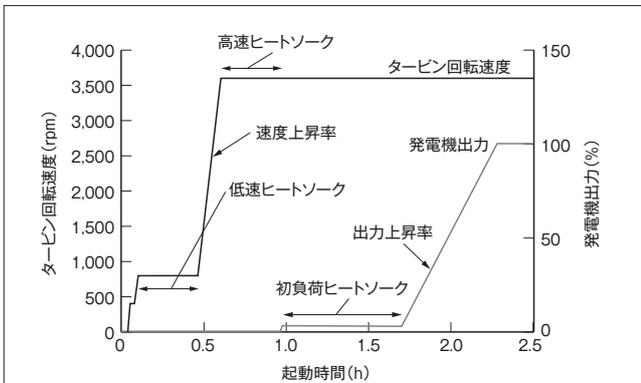


図1. ミスマッチチャートによる蒸気タービン自動起動 — 従来の起動方式では、タービン起動開始直前にロータ表面メタル温度とタービン入口蒸気条件を参照して、速度上昇率と出力上昇率が一意に定まる。

Steam turbine automatic start based on mismatch chart

### 4 火力用蒸気タービンとEHC制御装置

火力用蒸気タービン及びその制御装置の概略構成を図2に示す。蒸気タービンや発電機で計測される主蒸気圧力と温度、ロータ表面メタル温度、タービン回転数、発電機出力などの主要なプロセス信号は、EHC (Electro-Hydraulic Control) と称するタービン制御装置に入力され、それらの信号に基づいてタービン入口に配した蒸気弁を開閉することで蒸気タービン

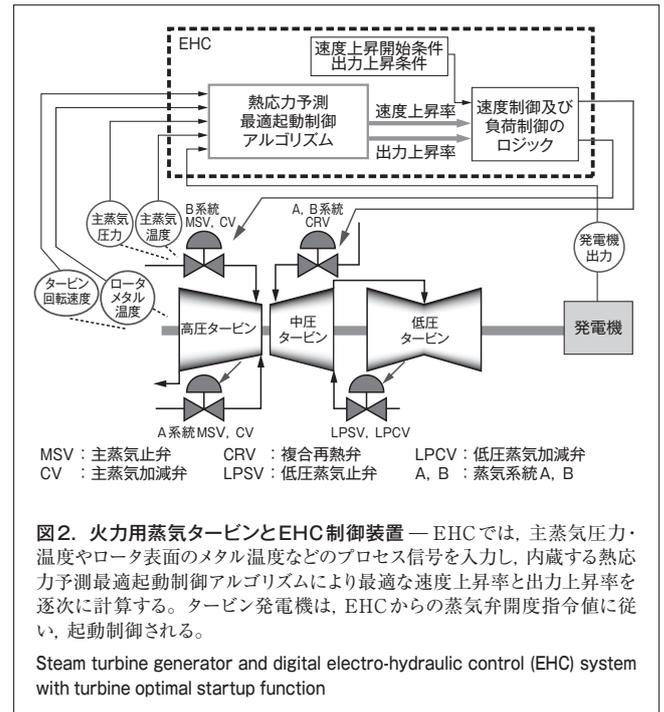


図2. 火力用蒸気タービンとEHC制御装置 — EHCでは、主蒸気圧力・温度やロータ表面のメタル温度などのプロセス信号を入力し、内蔵する熱応力予測最適起動制御アルゴリズムにより最適な速度上昇率と出力上昇率を逐次に計算する。タービン発電機は、EHCからの蒸気弁開度指令値に従い、起動制御される。

Steam turbine generator and digital electro-hydraulic control (EHC) system with turbine optimal startup function

の回転速度と発電機出力が制御される。

今回開発した熱応力予測最適起動制御アルゴリズムは、従来のミスマッチチャートによるタービン起動機能に替えてEHCの内部機能として組み込んだ。

### 5 適用技術

この章では、EHCに実装する熱応力予測最適起動制御アルゴリズムの概要を述べる。このアルゴリズムは、以下に説明する計算機能を連携させ、最適解探索のための収束計算を行う(図3)。

#### 5.1 第一段蒸気温度の予測

第一段蒸気温度  $T_s$  は、蒸気通路部の設計条件に基づいて、実測値である主蒸気温度  $T_{ms}$  及び主蒸気圧力  $P_{ms}$  の関数

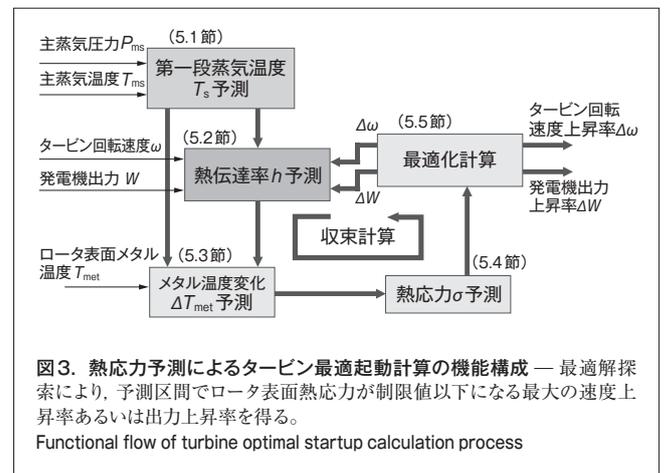


図3. 熱応力予測によるタービン最適起動計算の機能構成 — 最適解探索により、予測区間でロータ表面熱応力が制限値以下になる最大の速度上昇率あるいは出力上昇率を得る。

Functional flow of turbine optimal startup calculation process

$f$ として得られる。

$$T_S = f(T_{ms}, P_{ms}) \quad (3)$$

現時点 $k$ の $T_S(k)$ を基点とした予測区間 $m$ ステップにわたる予測値 $\hat{T}_S(k+i)$ ,  $i=1\sim m$ を式(4)で計算する。

$$\begin{aligned} \hat{T}_S(k+1) &= T_S(k) + \Delta T_S \\ \hat{T}_S(k+2) &= T_S(k) + 2\Delta T_S \\ &\vdots \\ \hat{T}_S(k+m) &= T_S(k) + m\Delta T_S \end{aligned} \quad (4)$$

$\Delta T_S$  : 前回計算時の $T_S$ から求めた第一段蒸気温度変化率

## 5.2 熱伝達率の予測

$T_{met}$ の変化 $\Delta T_{met}$ は、次式の熱伝達方程式で記述できる。

$$\Delta T_{met}(k+1) = h(k+1)\{T_S(k) - T_{met}(k)\} \quad (5)$$

$h(k+1)$  : 蒸気からメタルへの熱伝達率

次に、 $h$ とタービン回転速度 $\omega(k)$ 及び発電機出力 $W(k)$ との関係を定義するモデルとして、式(6)の比例モデルを仮定する。このモデル式は、予測熱応力と操作量であるタービン速度上昇率 $\Delta\omega(k)$ 及び出力上昇率 $\Delta W(k)$ を結びつける重要な要素であり、熱伝達率係数 $\alpha, \beta$ を $\omega(k), W(k), T_S(k), T_{met}(k)$ の各計測値に基づいて制御周期ごとに逆算で適応更新することで、モデル化誤差の影響を極小化している。

$$\begin{aligned} h(k) &= \alpha \omega(k) && (\text{系統への発電機併入前}) \\ h(k) &= \beta W(k) + h_0 && (\text{系統への発電機併入後}) \end{aligned} \quad (6)$$

$h_0$  : 無負荷定格回転数時の熱伝達率

式(6)及び最適化変数となる $\Delta\omega(k)$ を用いて、予測区間 $m$ ステップにわたる $h$ の推移 $\hat{h}(k+i)$ ,  $i=1\sim m$ を予測する。

$$\begin{aligned} \hat{h}(k+1) &= \alpha|\omega(k) + \Delta\omega(k)\}, \\ \hat{h}(k+2) &= \alpha|\omega(k) + 2\Delta\omega(k)\}, \\ &\vdots \\ \hat{h}(k+m) &= \alpha|\omega(k) + m\Delta\omega(k)\} \end{aligned} \quad (7)$$

更に、併入後の出力上昇過程での $h$ も、同様に式(6)と $\Delta\omega(k)$ を用いて予測する。

## 5.3 第一段メタル温度変化の予測

式(5)から、 $\Delta T_{met}$ の予測値 $\Delta\hat{T}_{met}(k+i)$ ,  $i=1\sim m$ を式(8)として計算する。

$$\begin{aligned} \Delta\hat{T}_{met}(k+1) &= \hat{h}(k+1)\{T_S(k) - T_{met}(k)\} \\ \Delta\hat{T}_{met}(k+2) &= \hat{h}(k+2)\{T_S(k+1) - T_{met}(k+1)\} \\ &\vdots \\ \Delta\hat{T}_{met}(k+m) &= \hat{h}(k+m)\{T_S(k+m-1) - T_{met}(k+m-1)\} \end{aligned} \quad (8)$$

$T_S$ の予測式(4)及び $h$ の予測式(7)をそれぞれ式(8)に代入することによって、計測値に基づいて $\Delta\hat{T}_{met}$ を予測できる。

## 5.4 ロータ表面熱応力の予測

$\sigma(k)$ を記述した式(1)と(2)は、熱応力の推移を予測する行列式(9)に拡張できる。この式(9)に前出の式(8)を代入することで、ロータ表面熱応力の推移 $\hat{\sigma}(k+l)$ ,  $l=1\sim m$ を、蒸気温度と圧力の計測値及びタービン起動過程の操作量である $\Delta\omega(k)$ と $\Delta W(k)$ から予測できる。

$$\begin{pmatrix} \hat{\sigma}(k+1) \\ \hat{\sigma}(k+2) \\ \vdots \\ \hat{\sigma}(k+m) \end{pmatrix} = C \begin{pmatrix} \hat{x}(k+1) \\ \hat{x}(k+2) \\ \vdots \\ \hat{x}(k+m) \end{pmatrix} = D\mathbf{x}(k) + E \begin{pmatrix} \Delta\hat{T}_{met}(k+1) \\ \Delta\hat{T}_{met}(k+2) \\ \vdots \\ \Delta\hat{T}_{met}(k+m) \end{pmatrix} \quad (9)$$

D, E : ロータ熱応力特性にかかわる定数行列

$$D = \begin{pmatrix} CA \\ CA^2 \\ \vdots \\ CA^m \end{pmatrix}, \quad E = \begin{pmatrix} CB & 0 & \cdots & 0 \\ CAB & CB & \cdots & 0 \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ CA^{m-1}B & CA^{m-2}B & \cdots & CB \end{pmatrix}$$

## 5.5 最適化計算

5.1~5.4節の計算を反復して、次の最適化計算を行う。得られた設計変数を最適値として選択し、起動制御に用いる。

設計変数 :  $\Delta\omega, \Delta W$

目的関数 :  $\Delta\omega, \Delta W$ の最大化 (上下限値あり)

制約条件 :  $\hat{\sigma}(k+l) \leq \sigma_{\text{threshold}}, l=1, 2, \dots, m$

$\sigma_{\text{threshold}}$  : 熱応力制限値

## 6 実機運転結果

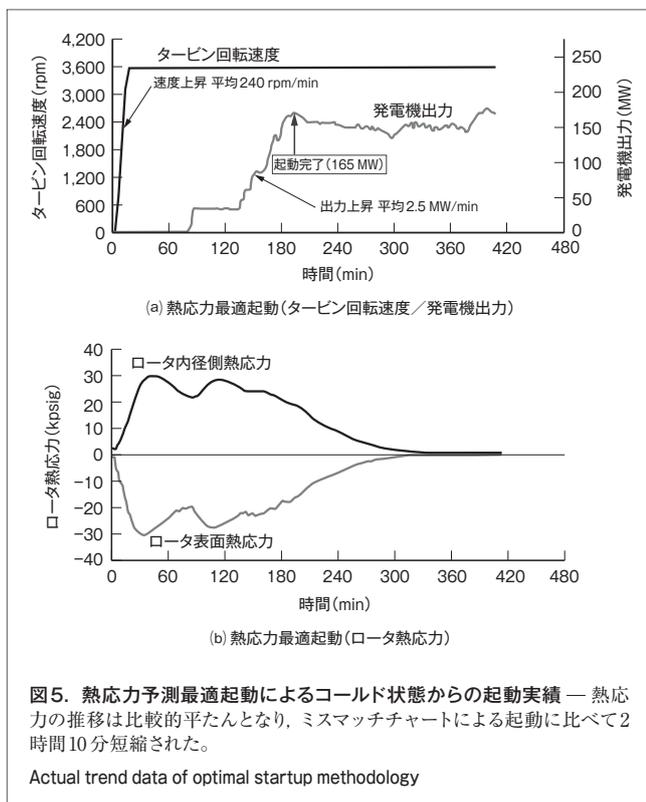
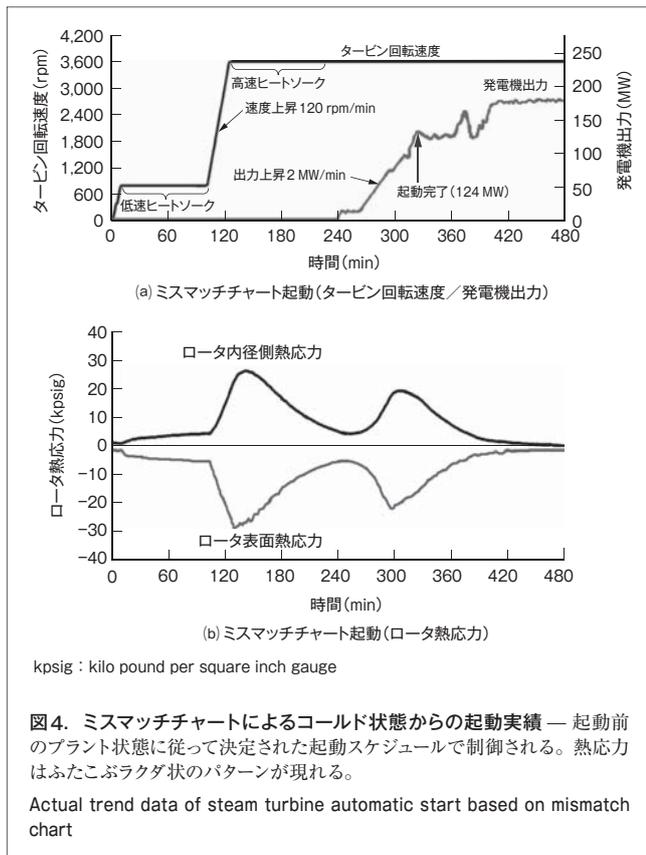
北米で稼働中の火力用蒸気タービンに開発したアルゴリズムを適用した。実機適用時の起動時間短縮の効果を述べる。

コンバインドサイクルプラントの蒸気タービンにおいて、定期検査完了後のコールド状態から、従来方式である mismatch チャートによって起動した際の過程を図4に示す。図4(a)に示すように、 mismatch チャートでの指示に従って低速域及び高速域で規定時間の速度保持(ヒートソーク)が実施され、速度上昇率として毎分120 rpm、出力上昇率は毎分2 MWで起動制御された。この結果、自動起動制御による出力上昇が124 MWで完了するまでに325分を要した。図4(b)は熱応力の推移を示し、定格速度への到達直後と出力上昇途中の二か所にピークが現れている。

同じタービン発電システムのEHC制御装置に熱応力予測最適起動制御アルゴリズムを導入し、コールド状態から起動させた結果を図5に示す。165 MWで自動起動が終了されるまでの所要時間は195分であり、図4の従来方式と比較して起

動時間は2時間10分短縮された。

一方、図5(a)に示すように、速度上昇率、出力上昇率ともに



ミスマッチチャート起動方式に比べて高率となった。また、低速ヒートソークが完全に省かれたことも、起動時間の短縮に寄与した。また、発電機出力40 MW近傍で出力が保持されているが、これは予測結果に基づいてEHC制御装置が熱応力を制限値内にとどめる制御を行った結果と考えられる。

更に、図5(b)に示すように、熱応力の推移はミスマッチチャート方式でのふたこぶらクダ状のパターンに比べて平坦なものになり、このアルゴリズムによる熱応力予測最適起動制御が有効に機能し、起動時間の短縮に結びついていることが読み取れる。

## 7 あとがき

熱応力予測によるタービン最適起動技術の開発を行い、実機適用を通じて起動時間短縮の効果が高いことを確認した。

タービンプラントの起動時間短縮に寄与する技術開発は、環境負荷軽減の観点からも今後ますます重要度が増すと考えられることから、いっそうの改善と応用に取り組んでいきたい。

一方、この技術の適用による効果は、プラント個々の設計仕様や運用条件と密接な関係があるので、その導入にあたっては運用データの分析などによる事前調査を行い、適切な解決方法をプラントユーザーと協調して立案し、推進していくことが重要と考える。

## 文献

- 神谷昭基, ほか. Theoretical Proof of Edge Search Strategy Applied to Power Plant Start-up Scheduling. IEEE TRANSACTIONS ON SYSTEMS, MAN, AND CYBERNETICS - PART B: CYBERNETICS. 32, 3, 2002, p.316-331.
- 薬師宏治, ほか. “熱伝達率係数逐次適応計算を用いた蒸気タービン発電機の熱応力予測起動制御”. 電気学会全国大会. 徳島, 2005-03, 電気学会. 2005, 論文番号4-224.



松本 茂 MATSUMOTO Shigeru

電力システム社 火力・水力事業部 火力プラント統括部主務。  
火力発電プラント向け監視制御システムのエンジニアリング業務に従事。日本機械学会、電気学会会員。  
Thermal & Hydro Power Systems & Services Div.



薬師 宏治 YAKUSHI Koji

電力システム社 府中事業所 発電システム制御部主務。  
火力発電プラント向け監視制御システムの設計に従事。電気学会会員。  
Fuchu Complex



北口 典昭 KITAGUCHI Noriaki

電力システム社 火力・水力事業部 火力改良保全技術部主幹。  
海外火力発電プラントのメンテナンス及びサービス計画業務に従事。日本機械学会会員。  
Thermal & Hydro Power Systems & Services Div.