

経年火力発電プラントのフレキシブルな起動を可能にする信頼性・運用性向上技術

Reliability and Operability Improvement Technologies Enabling Flexible Startup of Aging Thermal Plants

小野 泰規 ONO Yasunori 川村 将史 KAWAMURA Masafumi

地球温暖化対策として再生可能エネルギー（以下、再エネと略記）の導入拡大が進む一方で、太陽光発電や風力発電は気象条件によって発電量が大きく変動するため、従来の発電設備には一層フレキシブルな運用が求められる。ベースロード電源の一つである火力発電プラントでも、再エネによる発電量の変動に応じて素早く出力調整できるように、信頼性及び運用性の向上が求められている。

東芝エネルギーシステムズ(株)は、このような市場ニーズに応えて、経年火力発電プラントに対して適切な信頼性・運用性向上技術を開発してきた。最新鋭の蒸気タービン技術を適用し、蒸気タービンの起動停止回数の増加や、起動時間の短縮、負荷変動に対する追従性など、経年火力発電プラントのフレキシブルな起動を可能にする技術や、スナッパ翼や窒化チタンアルミニウム(TiAlN)コーティングなど、様々な信頼性向上技術により、電力の安定供給に寄与している。

The introduction of renewable energy systems such as photovoltaic and wind power plants, whose output is greatly affected by weather conditions, has recently been expanding as a measure against global warming. There is consequently an urgent need for conventional power plants, particularly thermal power plants as a representative type of baseload power supply, to have more flexible operability and higher reliability in order to rapidly adjust to such output power fluctuations.

In response to this situation, Toshiba Energy Systems & Solutions Corporation has been developing the following technologies appropriate for aged thermal power plants to improve their reliability and operability by applying state-of-the-art steam turbine technologies: (1) technologies to achieve flexible startup for steam turbines of aged thermal power plants including increasing the number of starting and stopping operations, shortening startup times, and attaining high load-following capability; and (2) various technologies to improve reliability through the application of snubber blades, titanium-aluminum-nitride (TiAlN) coatings, and other measures. These technologies are contributing to the realization of stable electric power supplies.

1. まえがき

我が国では、2011年3月11日に発生した東日本大震災以降、電源構成の約30%を占めていた原子力発電が稼働を停止したことで、エネルギーの安定供給及び経済効率性の観点から、石炭火力をベースロード電源として活用する方針が示されている。一方、地球温暖化対策として、2012年7月から始まった再エネの固定価格買取制度により、再エネ、とりわけ太陽光発電の導入拡大⁽¹⁾が一気に進んでいる。しかし、太陽光や風力などの再エネを利用した発電は、気象条件による出力変動が大きい。このため、再エネの導入拡大に伴い従来の火力発電プラントが出力調整を行うなど、その使われ方が変化してきており、火力発電プラントに一層の信頼性・運用性向上が求められている。

ここでは、これまで東芝エネルギーシステムズ(株)が、火力発電プラントに対しその信頼性・運用性向上を目的に、適用・提案してきた技術について述べる。

2. 蒸気タービン起動時間短縮への対応技術

再エネの導入拡大が進むと、気象条件によって発電量が大きく変化した場合、電力の需給バランスが崩れて電力の周波数が急変し、最悪の場合には大規模停電につながるおそれがある。これらの負荷変動への対応は、火力発電プラントが適しているが、これまで以上に、起動停止回数の増加や、起動時間の短縮、負荷変動に対する追従性など、フレキシブルな運用に対する要求が増してくると考えられる。

蒸気タービンの起動方法の設定には、起動前のタービンローターなどの低温機器が、蒸気によって高温になる過程で発生する熱応力や、伸び差、振動などを考慮する必要がある。当社は、このような観点での起動方法を国内外の発電プラントへ広く導入してきた。従来の蒸気タービン起動には、タービン起動の初期段階に、高圧タービン第1段の蒸気温度とローター表面のメタル温度の差(ミスマッチ温度)に応じて、試運転段階などで確立した幾つかの起動パターンから選択する、ミスマッチ起動が採用されてきた。この場

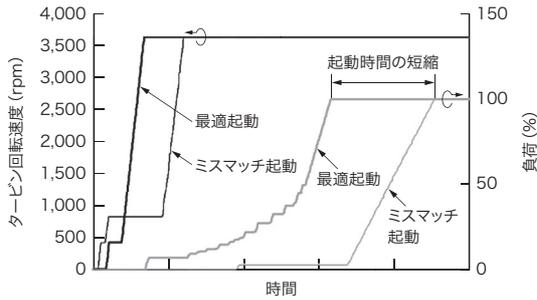


図1. 蒸気タービンのミスマッチ起動時間と最適起動時間の比較

定格出力に達するまでの起動時間は、最適起動の導入により、従来のミスマッチ起動に比べて大幅に短縮できる。

Comparison of mismatched and optimal startup times of steam turbines

合、タービンの回転数上昇率、出力上昇率、及びそれに必要な時間が一意的に決定される。ミスマッチ起動は、ボイラーと蒸気タービンの温度をマッチングさせるため、起動後の蒸気温度変化などの不確定要素を考慮して起動時間にマージンを持たせる必要があり、起動時間が非常に長くなることがあった。これを解決するために最適起動を導入した。最適起動は、蒸気タービンの蒸気温度や、蒸気圧力、熱伝達係数などのタービンローターに熱伝達する蒸気特性を逐次計測・予測し、ローターに発生する熱応力が最大となるように制御することで、蒸気タービンの起動時間を合理的に短縮できる(図1)。

高圧タービンは、高い圧力の蒸気に耐えるためにケーシングが厚く、熱容量が大きくなるため、起動時は、ケーシングの温度上昇が緩慢になる。一方、ローターは、高温の蒸気に直接さらされるため、ケーシングよりも温度上昇が速く、ケーシング(静止部)とローターで伸び差が発生するので、接触を避けるため、両者の間に適切な間隙を確保する必要がある。起動時間を短縮するには、起動時にローターとケーシングの温度上昇の差が大きくなるようにすることが課題となる。したがって、蒸気タービンをコールド起動する前に、タービン内部に少量の蒸気を流して暖機するプレウォーミングが広く採用されている。

これに対し、当社は、蒸気タービンの更なる起動時間の短縮と、伸び差やローター及びケーシングでの熱応力の低減などによる信頼性向上を目的として、最適起動に加え、ケーシングの保温材にヒーターを埋め込んだヒートブランケットでケーシング温度を制御する技術を採用している。

3. 火力発電プラントの信頼性・運用性向上技術

2章で述べたとおり、電力の安定供給のため、火力発電

は、頻繁な起動停止や、定格負荷から極低負荷までの幅広い範囲での運用などが求められる。また、国内では従来4年間隔で実施している蒸気タービンの点検(定期検査)が、6年間隔に延伸可能⁽²⁾となり、これに対するニーズも多く出てくると考えられる。したがって、これらの運用性の向上や安定・安全な電力供給のため、発電設備にはより一層の信頼性向上が求められる。

この章では、蒸気タービンの信頼性・運用性向上に寄与する技術について、その一例を述べる。

3.1 蒸気タービン低圧部の後流段落へのスナッパー翼適用

蒸気タービン低圧部の負荷と段落の蒸気状態の例を、図2に示す。後流段落には、蒸気の乾き域と湿り域の境目となる乾湿交番域(最終段の1, 2段手前で、図2中のL-2~L-1段落)が存在する。起動停止や負荷変化によって、この乾湿交番域となる段落が変動し、通常、湿り域となる部分が乾き域となることで、蒸気中に僅かに含まれる腐食成分が析出する。このため、頻繁な起動停止や、負荷変化によって、腐食成分が低圧タービンローターホイール植込部に蓄積、濃化されると、ローター材の高サイクル疲労強度が大幅に低下し、応力腐食割れや腐食疲労損傷の原因となる。

経年火力発電プラントの低圧タービンローターホイール植込部には、応力腐食割れや腐食疲労による損傷(クラック)が発見される場合がある。損傷が発生した蒸気タービンローターは、強度上の問題から継続使用ができないため、更新する必要がある。これに対し、腐食疲労損傷の要因の一つである運転中の振動応力を低減できるのが、図3に示すスナッパー翼である。蒸気タービン羽根のつづり方法を、

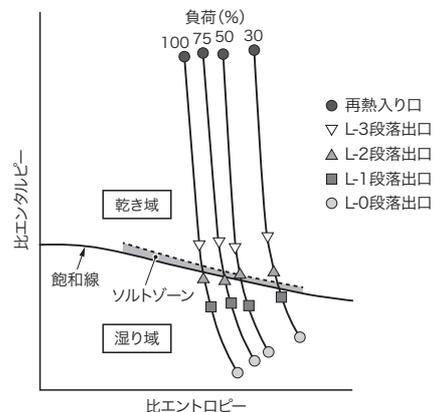


図2. 蒸気タービン低圧部での負荷と蒸気状態の関係

後流段落(L-2~L-1段落)には乾湿交番域があり、この境界が起動停止や負荷変化で変動するため、蒸気中の腐食成分が析出して蓄積し、ホイール植込部の腐食の原因となる。

Relationship between load and steam conditions in low-pressure (LP) turbine

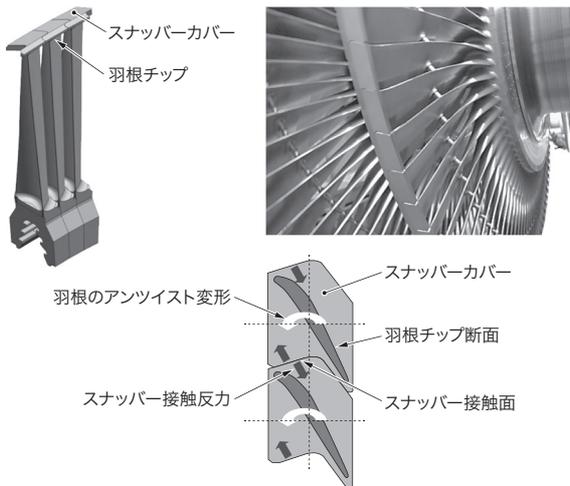


図3. 低圧タービン用スナッパ翼

運転中に発生する動翼のアンツイスト変形を利用することで、隣接する動翼同士が連結し、全周一群つづり構造となる。

Snubber blades for LP turbine

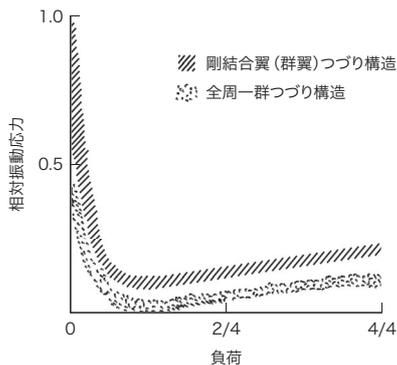


図4. スナッパ翼による振動応力の低減

全周一群つづり構造となることで、従来の群翼つづり構造に対し、運転時に発生する振動応力を約1/2に低減できる。

Reduction of vibration stress by application of snubber blades

従来のテノンシュラウドによる群翼つづり構造から、スナッパカバーによる全周一群つづり構造にすることで、図4に示すように、運転時に発生する振動応力を従来の約1/2に低減できる。また、テノンのかじめがないので、抜き取り点検が容易でメンテナンス性向上にも寄与する。低圧段動翼のうち、長翼にはねじれている翼部があり、回転時の遠心力によって翼部にアンツイストが発生するので、スナッパカバーが隣接する動翼のスナッパカバーと接触し、動翼同士が連結する構造としている。

3.2 新型耐SPEコーティング技術

ボイラーやHRSG（排熱回収ボイラー）では、伝熱管内面に酸化物（スケール）が生成され、起動停止動作で剥離

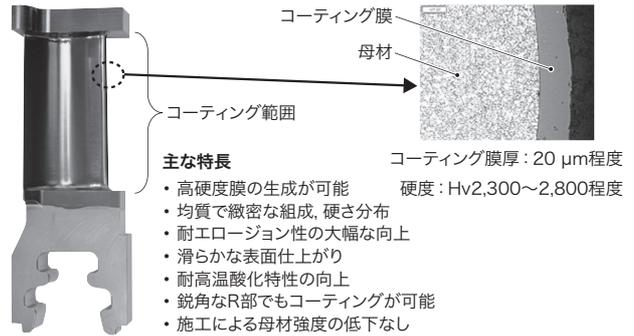


図5. PVDによるTiAlNコーティング

タービン動翼の表面に、PVDによる高硬度、均質、緻密なTiAlNコーティングを施すことで、翼部の耐エロージョン性を大幅に向上できる。

TiAlN coating formed by physical vapor deposition (PVD)

し、タービンに飛来する。スケールは硬質であり、これが蒸気の流れによって高速に飛来すると、蒸気タービンの高圧部や中圧部の各部入り口の段落は、SPE（Solid Particle Erosion：固体粒子侵食）を受ける。

このSPE対策として、B（ホウ素）の浸透・拡散によるホウ化処理や、Cr（クロム）-C（炭素）系のセラミック溶射技術で改善策を提供してきたが、これらは、主にノズル板向けの改良技術であった。

これに対し、当社は、(株)神戸製鋼所と共同で、動翼におけるPVD（Physical Vapor Deposition：物理蒸着）を用いたTiAlN（窒化チタンアルミニウム）コーティング技術を開発し、実機に適用している（図5）。このコーティングを施すことで、動翼の耐エロージョン性が大幅に改善され、起動停止回数が多く、長期間にわたって連続使用される過酷な運転環境下でも、蒸気タービンの信頼性を高め、より安全で安定した電力の供給に寄与できる。

4. 火力発電プラントの使われ方の変化に伴う蒸気タービンのレトロフィット

火力発電プラントの信頼性・運用性向上は、再エネの導入拡大だけではなく、火力発電プラントの使われ方の変化によっても必要となる。

例えば、プロセス蒸気が必要な製鉄・製紙・製油などの産業用ユニット内の発電設備として計画され運用されてきた蒸気タービンにおいて、産業のニーズの変化や廃止に伴う最適な改造を行い、発電設備としての延命や性能向上が図られている。逆に、建設当初は発電目的で計画されていた復水タービンを、抽気タービンへ改造するものもある。

近年は、経年火力発電プラントが廃止されるケースも増えており、その際に廃止される蒸気タービンの抽気システム

を、ほかの復水タービンから抽気して賄う改造や、二酸化炭素を分離回収するために、中圧タービン排気などから大量に抽気する改造が検討されている。

抽気タービンから復水タービンへの改造例としては、米国ペンシルバニア州のコンバインドサイクル発電プラント(定格30万kW)がある。当社は、この発電プラントの建設時に、抽気タービン及び発電機を納めている。2004年の運転開始時から、この発電プラントでは、蒸気タービンから抽気したプロセス蒸気を製油所に送り、製油所からの排ガスを利用してダクトバーナーをたく、という運用がなされていたが、2012年に、抽気蒸気の使用先である製油所が閉鎖されることになった。一方で、発電は継続して行うことになったため、抽気が必要なくなった蒸気タービンは、流入蒸気のバランスなどの運転条件が大きく変わり、最適点から大きく外れた運用を余儀なくされることになった。例えば、低圧タービンは、抽気ラインの閉鎖で入り口蒸気流量がおおよそ20%増加するため、低圧タービンに送り込む蒸気流量を大きくする改造が必要で、全体の流入蒸気バランスも変わるので、スラスト力の検討も必要になる。また、客先の希望する経済性を踏まえ、最適なスコープや技術が必要である。当社は、これらを考慮した技術提案を行い、方針のすり合わせを続けることで、2018年に、外部車室流用による蒸気タービンのレトロフィットプロジェクトを受注した。

また近年、低炭素社会の実現のため、経年火力発電プラントでは、燃料転換されるケースも多い。従来の火力発電プラントのコンバインドサイクル発電化(リパワリング)やバイオマス発電化などである。リパワリングは、燃料高騰の折にもトレンドとなったが、脱炭素化の流れによる経年石炭火力発電プラントの廃止に伴い、燃料転換のニーズは続いており、当社も国内外で積極的な技術提案を行っている。

バイオマス発電化の例では、兵庫県相生市にある相生バイオエナジー(株)(関西電力(株)と三菱商事パワー(株)の特定目的会社)の相生発電所2号機が挙げられる(図6)。

この発電プラントは、既設の重油・原油だき(1982年運転開始、定格37.5万kW)からバイオマスだき(定格約20万kW)へと燃料転換を図るもので、再エネ比率の向上への寄与や、稼働機会が減少する油火力の既存設備を有効活用する観点から計画された。当社は、既設プラントの蒸気タービン及び発電機を納入していたが、バイオマス化に伴い、既設メーカーの強みを生かした蒸気タービン最適化を技術提案し、2018年に蒸気タービンの改修工事を受注した。

このように、近年、産業や発電事業を取り巻く環境が大きく変わり、既存の火力発電プラントの使用目的が変更され



写真提供:関西電力(株)

図6. バイオマス化で蒸気タービンを改修する相生発電所2号機
相生バイオエナジー(株)の発電プラントで、今回、既設の重油・原油からバイオマスへ燃料転換するための改修工事を行う。
Aioi Power Station Unit 2 of The Kansai Electric Power Co., Inc., scheduled for conversion to biomass fuel

るケースや、燃料転換を行うケースが出てきている。また、国や地域によっては、発電設備単体では発電の認可が受けづらく、産業用ユニット化が必要なケースもあり、蒸気タービン改良のニーズは今後も続くと考えられる。当社は、今後も、発電プラントオーナーの意向を鑑みながら、使われ方の変化に応じた柔軟な改良技術を提案していく。

5. あとがき

温室効果ガスの排出抑制や、再エネの導入拡大により、従来の火力発電プラントの使われ方が変化してきている。

当社は、最適起動やスナッパー翼などをはじめとする様々な技術を適用し、経年火力発電プラントの信頼性・運用性の向上を図ることで、引き続き電力の安定供給に貢献していく。

文献

- (1) 資源エネルギー庁. 平成28年度エネルギーに関する年次報告(エネルギー白書2017). 経済産業省 資源エネルギー庁, 2017, 367p.
- (2) 資源エネルギー庁. 電気事業法等の一部を改正する等の法律. 経済産業省 資源エネルギー庁, 2015, 332p. <http://www.enecho.meti.go.jp/category/electricity_and_gas/electric/system_reform006/pdf/20150617_01.pdf>, (参照 2019-01-28).



小野 泰規 ONO Yasunori
東芝エネルギーシステムズ(株)
パワーシステム事業部 火力サービス技術部
Toshiba Energy Systems & Solutions Corp.



川村 将史 KAWAMURA Masafumi
東芝エネルギーシステムズ(株)
パワーシステム事業部 火力サービス技術部
Toshiba Energy Systems & Solutions Corp.