

サーマルエネルギー発電の運用性・保守性を向上させるDX技術

DX Technologies Improving Maintenance and Operation of Thermal Power Generation Systems

村山 大 MURAYAMA Dai 近藤 淳 KONDO Jun 川野 翔平 KAWANO Shohei

東芝は、エネルギーを取り巻く国内外の社会課題に対し、運用から保守までの各ライフサイクルでサーマルエネルギー発電事業者を支援するDX(デジタルトランスフォーメーション)技術を開発・適用している。周波数維持や調整力確保に伴う発電所の機械的負荷増に対しては、状態基準保全(CBM: Condition Based Maintenance)を実現するオンライン絶縁診断技術を導入し、運用条件に基づく余寿命の定量的な提示を可能にした。また、再生可能エネルギー領域では、バイオマス発電所向けに、複数パラメーターを統合的に制御するボイラー最適運転技術を開発し、実際の発電所に導入することで、熱効率最大0.24%の向上を確認した。更に、これら個別設備の運用・保守の高度化を全体運用に発展させるため、複数発電所の最適運用を実現する最経済運用システムに三次調整力対応や運転の制約条件を追加するとともに、システム冗長性の強化を行って24時間365日の運用を可能とし、発電事業者が保有する複数発電所全体での運用性向上を実現した。

In response to energy-related social issues in Japan and other countries, Toshiba Corporation has been developing and supplying the following digital transformation (DX) technologies to support thermal power generation companies throughout the life cycle of thermal power plants, from operation to maintenance: (1) an online insulation diagnostic technology to achieve condition-based maintenance by quantitatively evaluating the remaining service life based on operating conditions, in order to address increased mechanical stresses on thermal power plants caused by frequency control and the operational adjustments required to secure balancing capabilities; (2) a boiler combustion optimization technology for biomass power plants to integrally control multiple parameters, improving the combustion efficiency of a plant where the technology has been implemented by up to 0.24%; and (3) a technology to optimize the operational performance across an entire fleet of power generation assets owned by each company, based on technologies for individual power plants—not only by applying tertiary control reserves and additional operating constraints to economic dispatch systems for multiple power plants, but also by enhancing the system redundancy—thereby enabling 24/7 operations.

1. まえがき

2025年2月に策定された「第7次エネルギー基本計画」⁽¹⁾においては、再生可能エネルギーや蓄電池の導入拡大を推進するとともに、周波数維持及び調整力確保の観点から既存のサーマルエネルギー発電を継続活用しながら、データセンターや半導体工場の新増設などによる将来の電力需要の増加に備える必要がある、とされている。

東芝は、保有するDX技術を運用から保守の各ライフサイクルで活用し、このような社会課題を解決している。直近では、次の導入事例が挙げられる。

- (1) 周波数維持及び調整力確保に伴う発電所の機械的負荷増に対する発電機のCBM技術
- (2) バイオマスプラント向け運転高度化システムによる運用性の向上技術
- (3) 国内発電事業者向けの発電所最適運用によるバリューチェーンを含めた経済性の追求及びカーボンニュートラルを支援する運用技術

ここでは、上記の三つの技術の特徴と直近の成果について述べる。

2. 発電機固定子巻線のオンライン絶縁診断

2.1 発電機向けIoT監視システムの概要

近年、太陽光発電や風力発電などの変動性再生可能エネルギーの導入拡大に伴い、火力発電には電力需給バランスを調整する調整電源としての役割が一層求められている。これにより、発電設備には急激な負荷変化や起動・停止回数の増加といった運用ストレスが加わり、従来以上に劣化進行や突発故障のリスクが高まっている。このような運用環境の変化により、一定期間ごとに点検を行う時間基準保全(TBM: Time Based Maintenance)だけでは設備状態を十分に把握することが難しくなっており、設備状態に基づいて保全を行うCBMの重要性が高まっている。特に発電機における絶縁・界磁の健全性を常時監視し、劣化兆候を早期に捉えるIoT(Internet of Things)技術の活用が期待されている。

当社では、これらの課題に対応するため、発電機向けに五つのIoT監視システムを開発してきた(図1)。その中でも固定子巻線の絶縁劣化を運転中に監視する“オンライン絶縁診断”については、中国電力(株)新小野田発電所1号機において概念実証(PoC: Proof of Concept)を実施し、実機環境での有効性を確認した。この技術は停止点検に依存せず運転中に絶縁劣化の兆候を把握できることから、CBMへの移行を強力に支援するとともに、突発停止リスクの低減や、保全最適化、運転条件変更への即応性など、発電所全体の運用高度化に寄与する。

2.2 オンライン絶縁診断技術のPoCによる有効性検証

発電機固定子巻線の絶縁は、高電圧や、熱負荷、電磁力による振動、起動・停止に伴うヒートサイクルなどにより経年劣化する。劣化が進行すると部分放電(PD: Partial Discharge)が増加し、局所的な絶縁破壊を経て最終的には絶縁故障に至る可能性がある。こうした劣化を適切に把握するには、運転状況を反映した継続的な診断が重要となる。しかし、従来は定期点検時のオフライン試験(絶縁抵抗測定、耐電圧試験、tanδ試験など)に依存していたため、診断頻度が限られること、運転ストレス(実運転状況)を反映できないことなどが問題であった。

当社が開発したオンライン絶縁診断技術⁽²⁾、⁽³⁾は、相分離母線(IPB: Isolated Phase Bus)に非接触型PDセンサーを設置し、運転中に発生するPDパルスを検出するものである。非接触方式は従来の接触式センサーと比較して感度が相対的に低下するものの、当社独自のシグナル弁別技術により、微小なシグナルの高精度識別が可能になった。更に、このセンサーは、高電圧部に接続しない構造とすることでセ

ンサー故障を原因とする発電機及び主回路の絶縁低下の懸念を排除するとともに、機外設置を可能とすることで既設発電機への適用性を大幅に高めている。既設設備への導入は2~3日で後付け可能であり、週末停止などの短い停止期間で施工できる点も大きな特長である(図2)。

取得したPDデータのトレンドを解析し、独自モデルにより残存破壊電圧(BDV: Breakdown Voltage)を推定することで、絶縁劣化の進行程度と余寿命を定量的に評価できる。余寿命トレンドグラフを図3に示す。更に、このモデルは運転条件と劣化進行の関係を定量的に扱えるため、将来の運転パターンを仮定した余寿命シミュレーションにも適用可能

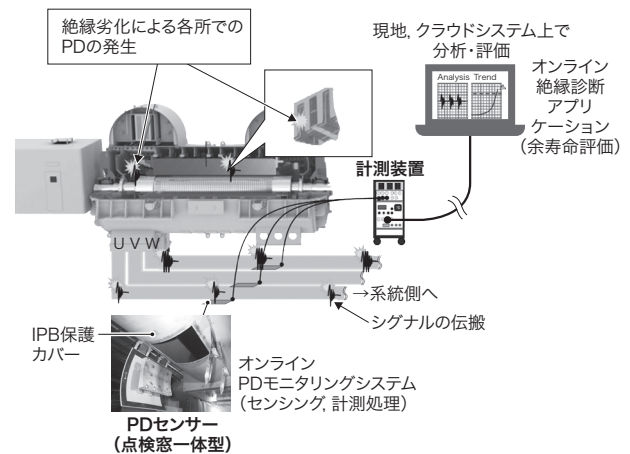


図2. 固定子巻線のオンライン絶縁診断システムの概要

高電圧部に接続しない構造を採用してセンサー故障を原因とする発電機及び主回路の絶縁低下の懸念を排除した。また、機外設置を可能とし、既設発電機への適用性を大幅に高めた。

Overview of online insulation diagnostic system for stator windings

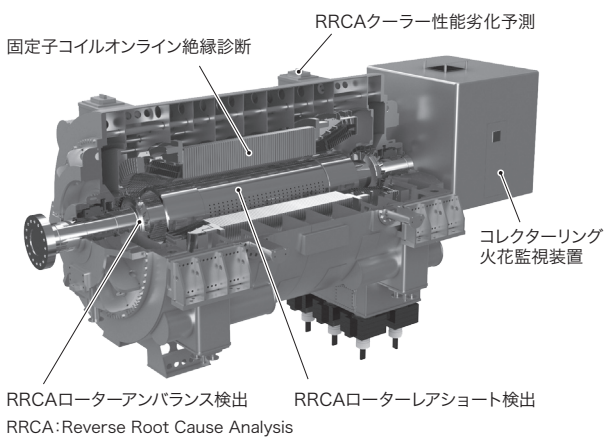


図1. 発電機を対象としたIoT監視システムのラインアップ

発電機運転中でも絶縁の余寿命診断をはじめとする発電機の状態把握が可能であり、CBMへの移行を強力に支援する。

Internet of Things (IoT) monitoring systems for generators



図3. 中国電力(株)新小野田発電所1号機におけるオンライン絶縁診断計測結果

取得した過去及び現在のPDデータから独自モデルによりBDVを算出し、将来の運転パターンを仮定することで当社発電機における余寿命の推移を予測可能にした。

Example of online insulation diagnostic display showing remaining service life obtained through proof of concept (PoC) at actual plant

である。従来技術では困難であった余寿命の数値化を実現した点は、開発した技術の大きな差別化要素であり、保全計画の高度化に寄与することが確認された。

3. バイオマスボイラーの熱効率改善ソリューション

3.1 バイオマスボイラーと最適運転技術

バイオマスボイラーは、木質チップや、ペレット、パームやし殻などの生物資源(バイオマス)を燃料として用いるボイラーである。バイオマス発電は、このボイラーで発生させた高温高圧蒸気によりタービン発電機を回転させ、発電する。燃料が光合成で大気中の二酸化炭素を吸収した生物資源由来のため、燃焼により発生する二酸化炭素が大気中の二酸化炭素に影響を与えないカーボンニュートラルな発電方式である。また、カーボンニュートラルな発電方式の中でも、太陽光発電などと異なり、天候などによらずに出力が安定な電源である。

一方で、バイオマス燃料は、生物資源由来であることから、発熱量にばらつきがある。このばらつきに応じて、発熱量の異なる木質チップやペレット、パームやし殻などを適切に混合するとともに、運転設定値(パラメーター)を最適に調整することで、より燃料を節約できる見込みがある。

循環流動層ボイラーの空気及び燃料系統について、概略を図4に示す。系統が複雑に構成されており、関連するパラメーターを変更することで、取熱バランスが変わる。この特性を利用することで、効率を向上させるようにパラメーター

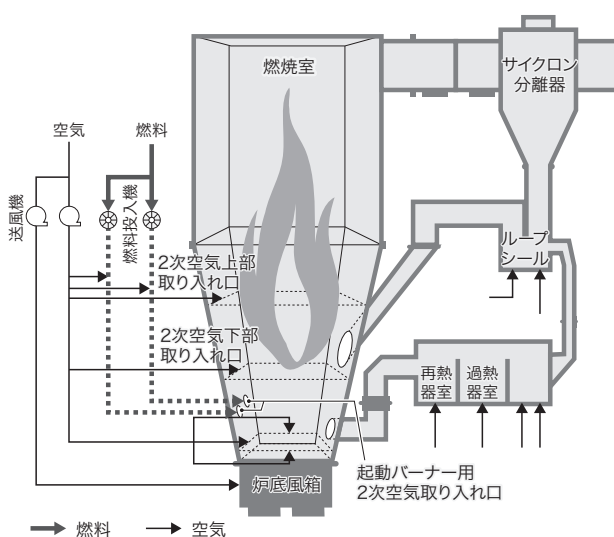


図4. 循環流動層ボイラーの空気及び燃料系統

最適運転技術は、系統が複雑なボイラーの関連パラメーターを調整することにより取熱バランスを変更し、効率を向上させる。

Air and fuel systems of circulating fluidized-bed boiler

の調整を行う最適運転技術を開発した。

3.2 最適運転技術のバイオマス発電所への適用

開発した手法を、徳島津田バイオマス発電所合同会社の徳島津田バイオマス発電所(設備容量74.8 MW)に適用して評価した。調整したパラメーターは、①燃料投入比率、②燃焼用空気量、③流動層関係の項目、に分類できる。

調整項目と調整箇所について、表1に詳細をまとめた。いずれの項目もボイラー出力を変えずに投入する燃料を削減することを目的として、ボイラー内部の取熱バランスを最適化するために必要な調整箇所である。

調整方法について、図5にて説明する。調整方法は、大きく分けて、“運転データ採取”と“効率改善の実証”の2段階から成る。運転データ採取では、複数のパラメーターを個別に変更した状態で運転し、データを採取する。これらの結果から各パラメーターが効率に与える影響を評価し、複数の運転パラメーターの最適な組み合わせを決定した。効率改善の実証では、この最適な組み合わせに沿ってパラメーターを設定して運転することで、熱効率向上を評価する。

3.3 バイオマス発電所での運転評価

効率向上の評価は、3.2節で述べたバイオマス発電所にて、従来のパラメーターで運転した場合と、最適パラメーターで運転した場合を比較することで実施した。

発電所のボイラーでは、投入する燃料の種類やパラメーターに加えて、熱交換器内のすすや灰の除去を目的としたスートブロワーの実施前後で効率変動することが知られている。このため、スートブロワーの影響が少ない時間帯に、燃料種別が大きく変わらない条件で、パラメーターを変更して比較した。最適なパラメーター調整値は、実際には、ずれる可能性があり、複数の調整ケースについて評価した。

評価の結果、ボイラー内部温度やファン回転数が制約条件範囲を逸脱する場合は評価から除外した。この評価の範囲で、効果として最大0.24%の熱効率向上を確認できた。今後の運用に伴って特性が変化した場合を想定し、再チューニング機能を盛り込んだ形で、最適化ツールを準備している。

今後、燃料のオフライン分析や、運転のオンライン評価システムなどと組み合わせ、ソリューションとして提供してい

表1. 循環流動層ボイラーの調整項目と調整箇所

Items and parts requiring adjustment in circulating fluidized-bed boiler

番号	調整項目	調整箇所
①	燃料投入比率	複数フィーダー間の配分調整
②	燃焼用空気量	流量計量不変のまま複数経路間の配分調整
③	流動層関係	外部熱交換器での取熱配分調整

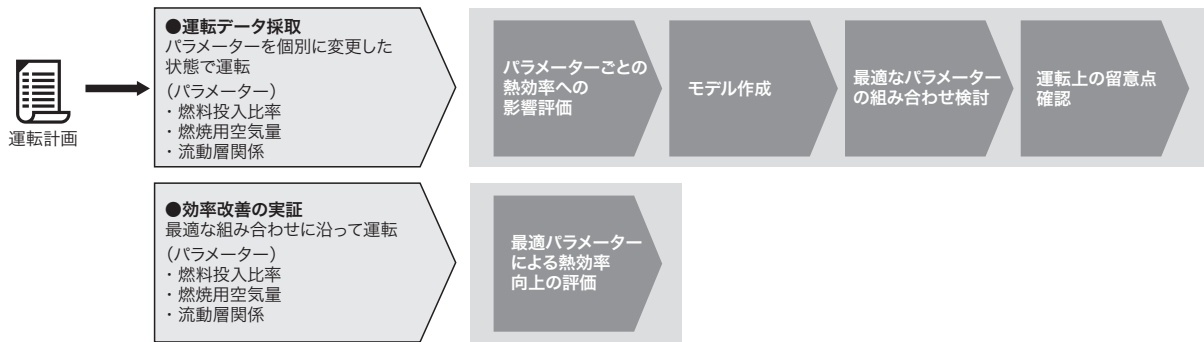


図5. バイオマス発電所向けのパラメーター調整方法

各パラメーターを個別に変更して採取したデータから、複数の運転パラメーターの最適な組み合わせを決定し、これに沿ってパラメーター設定して運転することで、熱効率を評価する。

Parameter tuning process for biomass power plants

くことを検討している。

4. 最経済運用システム

図6に示す最経済運用システムは、電力需要に対して複数の発電所の運転状態を経済性の観点から最適化し発電計画を作成するシステムであり、(株)JERAへ納入し運用されている。ここでの“最経済運用”とは、各発電機の燃料費や運転制約を考慮し、総コストを最小化する発電量の組み合わせを計算する手法(Economic Dispatch)を指す。

このシステムでは、発電会社が管理する全ての発電ユニットが持つ基本条件及び運用上の制約条件(最低出力、起動時間など)を満たしつつ、時々刻々と変化する電力需要に応じて、どのユニットにどれだけ発電させるかといった複雑な問題を、汎用最適化ソルバーと当社独自の解法を組み合わせた最適化計算技術により、高速に解くことができる。また、その際、需要に応じて出力を変化させる際には、各発電ユニットの出力変化率(出力を1分間にどれくらい増減できるかを示す指標)も考慮するなど、ほかに類を見ない精緻な条件設定にも対応している。

更に、基本条件・制約条件を満たした上で最大限発電した場合に可能な電力供給量を計算する“供給力モード”も搭載している。これは、通常の経済最適化とは別に運転余力及び停止余力を把握するための機能であり、発電計画との差分から市場への応札可能量の算出の諸元となっている。

これら特徴的な機能を備えた最経済運用システムは、発電計画の立案や、電力広域的運営推進機関(OCCTO)^(注1)への運転状況連携、電力取引市場・需給調整市場^(注2)への入札業務などを24時間絶え間なく実施している“プラント

運用センター”の業務で活用されている。

最経済運用システムは、電力取引市場及び需給調整市場の制度に対応し、OCCTOへの提出情報を生成する役割も担うため、制度改正に応じた更新も常に実施している。2025年度には、需給調整の目的で頻繁に起動停止を繰り返す火力発電の運転状況を踏まえ、起動回数制限(設備寿命や燃焼部品の損耗を抑えるために設定される上限)の管理機能を強化した。また、需給調整市場における停止余力の算出のために、発電計画上では停止させている発電所についても、最大供給電力量計算時には起動できるように制約条件を拡充した。加えて、三次調整力^②(変動性再生可能エネルギーの予測誤差に対応する調整力)の取引単位が3時間から30分へ変更される制度にも対応した。これにより細かい時間粒度での応札が必要となり、システム側でも計算ロジックとデータ処理の拡張を行った。

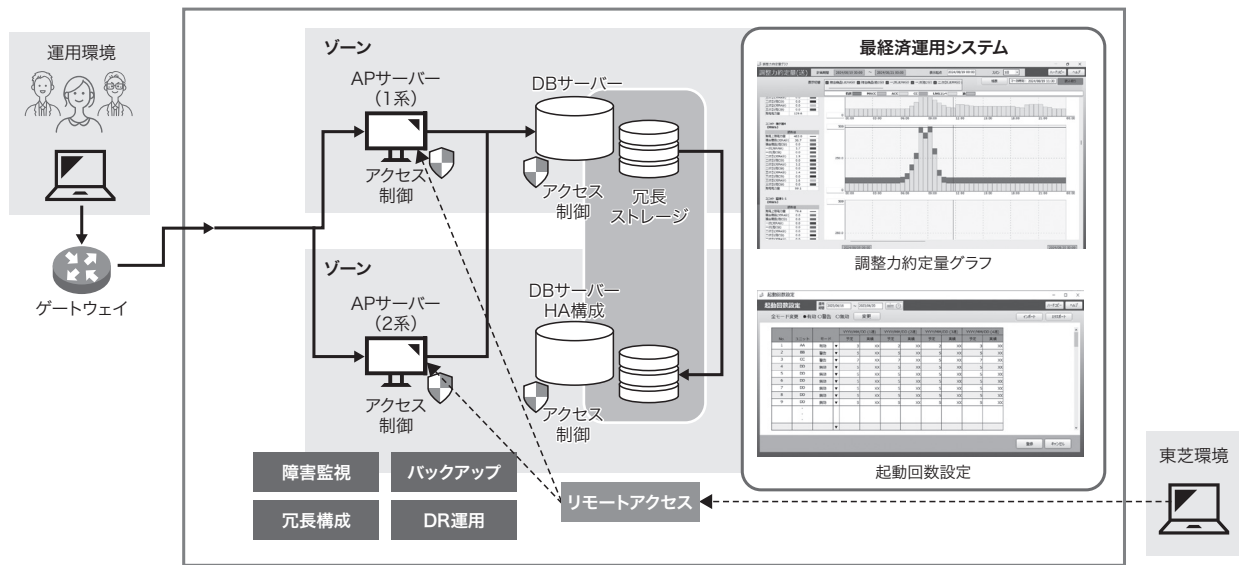
最経済運用システムは、24時間365日の連続稼働が求められるプラント運用センター業務を支え続けるため、オンプレミスの旧システムから完全クラウド運用に、2024年9月より移行しており、①クラウド環境のバックアップソリューションによるデータ保護、②ゾーン冗長構成(複数データセンターに分散配置し、システム停止リスクを低減)による可用性向上、③リージョン間バックアップ(大規模障害に備え、遠隔地へデータを複製)を利用したディザスターリカバリー対応、④クラウド障害監視と保守運用サービスの連携による24時間365日対応保守運用、を採用して高可用性及びメンテナンス性の向上を実現している。

5. あとがき

バイオマス再生可能エネルギーを含むサーマルエネルギー発電において、設備状態の監視、最適運用、経済性向上

(注1) 国内の広域系統を監視し需給維持を行う機関。

(注2) 電力の需給バランスを維持するために発電電力・調整力を売買する市場。



AP:アプリケーション DB:データベース DR:ディザスタリカバリー HA:ハイアベイラビリティ

図6. (株)JERA納入最経済運用システムの構成

発電計画の立案や、OCCTOへの運転状況連携、電力取引市場・需給調整市場への入札業務などを24時間365日実施可能な高可用性、及びメンテナンス性の向上を実現している。

Configuration of economic dispatch system delivered to JERA Co., Inc.

を支える当社DX技術の取り組みを示した。オンライン診断による信頼性向上、バイオマスボイラーの効率改善、複数発電所を統合した最経済運用は、いずれも電力供給の安定化と運用負荷の低減に寄与している。

今後も、制度変化や電源構成の多様化などの社会変化に対応して、デジタル及びDX技術を活用しながらソリューションを継続的に提供し、発電事業者の運用と保守を支えていく。

文 献

- (1) 資源エネルギー庁. エネルギー基本計画の概要, 2025, 10p. <<https://www.meti.go.jp/press/2024/02/20250218001/20250218001-2.pdf>>, (参照 2026-01-27).
- (2) 酒井正弘, 佐藤文生. 発電機のオンライン絶縁診断. 東芝レビュー, 2008, 63, 4, p.42-45.
- (3) 高橋友彰, ほか. 水車発電機の稼働率向上技術. 東芝レビュー, 2025, 80, 1, p.29-32. <<https://www.global.toshiba/content/dam/toshiba/jp/technology/corporate/review/2025/01/a08.pdf>>, (参照 2026-02-05).



村山 大 MURAYAMA Dai
総合研究所
エネルギーシステムR&Dセンター システム制御技術開発部
計測自動制御学会会員
System Control Engineering R&D Dept.



近藤 淳 KONDO Jun
サーマル&ハイドロパワー事業部
サーマルエナジー情報制御技術部
Thermal Cycle I&C Engineering Dept.



川野 翔平 KAWANO Shohei
サーマル&ハイドロパワー事業部
サーマルエナジー電機システム技術部
Thermal Cycle Electrical Engineering Dept.