

マイクロタービンコージェネレーションシステムの 遠隔監視と故障診断

片岡 匡史* 岸川 忠彦* 坂田 滋**
中川 貴博** 石黒 淳**

Remote Monitoring and Failure Diagnosis of a Microturbine Cogeneration System

by Tadashi KATAOKA, Tadahiko KISHIKAWA, Shigeru SAKATA, Takahiro NAKAGAWA, & Jun ISHIGURO

A remote monitoring and failure detection-diagnosis system, capable of high capacity and high speed data acquisition and storage, as well as data sharing via the Internet, has been developed for use in microturbine cogeneration systems. This system enables optimal trouble-shooting and maintenance. Accumulated long-range trend data can also be used to predict the possibility of failure and such, thus enabling preventive measures and maintenance to be carried out accordingly. The operability of a microturbine cogeneration system, which uses this monitoring and diagnosis system, has been reported to exceed 99.5%, indicating that this system is significantly upgrading reliability.

Keywords: Microturbine, Remote monitoring, Failure detection, Failure diagnosis, Predictive maintenance

1. はじめに

マイクロタービンコージェネレーションシステムは、ガスタービンエンジン、発電機、パワーコンディショナ(PCS)、燃料ガス圧縮機、排熱回収装置など多くの複雑な機器で構成された、いわば小さな発電プラントである。しかし、小規模分散型発電装置としてのマイクロタービンには、専任のオペレータやメンテナンス要員が配置されることは少なく、一方で高い稼働信頼性、毎日起動・運転停止における高い起動信頼性、低メンテナンスコストが要求されている。高信頼性を得るためには機器や部品に高品質と高耐久性が要求されるが、それは同時に高コストを招くという矛盾を抱えている。適切なコストで最大の運用効率を得るために、産業用ガスタービンや航空エンジンでは、燃焼器やタービンブレードなどの主要部品の劣化や損傷の進行状況を逐次点検し、適切な時期に

補修又は交換する手法が採られている。一方、マイクロタービンでは熟練技術者による常時の運転監視や点検が期待できないため、遠隔監視による運用とメンテナンスのサポートが不可欠である。

遠隔監視の第一の目的は、緊急停止時の原因分析及再起動の可否判断である。緊急停止は、機器の故障のほかにも瞬時停電や燃料供給のシャ断など様々な要因で発生し、すぐに再起動して差し支えない場合が少なくない。また電力会社とユーザ間の契約によっては、発電停止中に消費電力が契約電力量を超えると付加料金が課され、契約料金が上がる。したがって緊急停止時には、速やかに再起動の可否を判定し、その結果をユーザに通知しなければならない。第二の目的は、故障の根本原因の究明と再発の防止である。故障の部位と原因は様々であり、かつ複雑であるが、故障発生前後の状況を詳細に分析することによって、根本原因の特定と有効な対策が可能になる。第三の目的は健全性評価と故障予知の実施である。蓄積されたデータベースの比較評価により運転状態の良否を判定できる。また、潜在する異状を故障や緊急停止の発生前に見出し、事前に処置することが可能になる。更に、長期にわたる時系列データの変化傾向から修理の要否と時期を決定し、メンテナンスの最適化を図ることができる。

* 風水力機械カンパニー エネルギー事業統括部 マイクロガスタービン技術室

** 同 同 同
技術グループ

** ITエンジニアリング(株)

日本ガスタービン学会誌 Vol.35, No.6 (2007) に掲載されたものを、(株)日本ガスタービン学会の許諾を得て、一部加筆、修正した。

表 主要諸元

Table Microturbine cogeneration package specifications

定格発電出力 Rated power output	95 kW
定格回転速度 Engine rated speed	68000 min ⁻¹
圧縮比 Compressor pressure ratio	4
発電効率 Electrical efficiency	28% (± 1%)
排気ガス温度 Exhaust gas temperature	280 °C
排気ガス流量 Exhaust gas flow	2400 m ³ /h (NTP)
熱出力 Heat output	155 kW (温水 Water) 106 kW (蒸気 Steam)
質量 Package mass	約3000 kg
寸法 (L × W × H) Dimensions	3450 × 1150 × 2680 mm



08-65 01/219

写真 遠隔監視センター

Photo Remote monitoring center

タを用いた故障診断手法と長期間トレンドデータを用いた故障予知手法を、いくつかの事例を用いて解説する。

2. 遠隔監視システム

著者らは、表に主要諸元を示すマイクロタービンコージェネレーションパッケージの開発¹⁾にあたり、大容量高速データの獲得と保存、並びにインターネットによるデータの共有を可能にした遠隔監視システムを同時に開発した。販売したすべてのパッケージにこの監視システムを標準装備することで、1日24時間1年中サポートできるサービス体制を構築している。24時間監視を行っている遠隔監視センター内の様子を写真に示す。本稿では、遠隔監視システムの構成と機能を紹介し、高速過渡デー

遠隔監視システムのハードウェア構成を図1に示す。マイクロタービンコージェネレーションシステムはパワーコンディショナ制御ボード、マイクロタービンエンジン制御ボード、システム制御ボードの3枚のマイクロプロセッサ搭載制御ボードをもつ。それぞれの制御ボードはRS485データ通信バスで接続され、更にRS232C通信バスでローカルデータサーバ (LDS) に接続される。それぞれの制御ボードがもつセンサ信号測定値、演算値、設定値、状態値、警報メッセージなどのデータは、LDSか

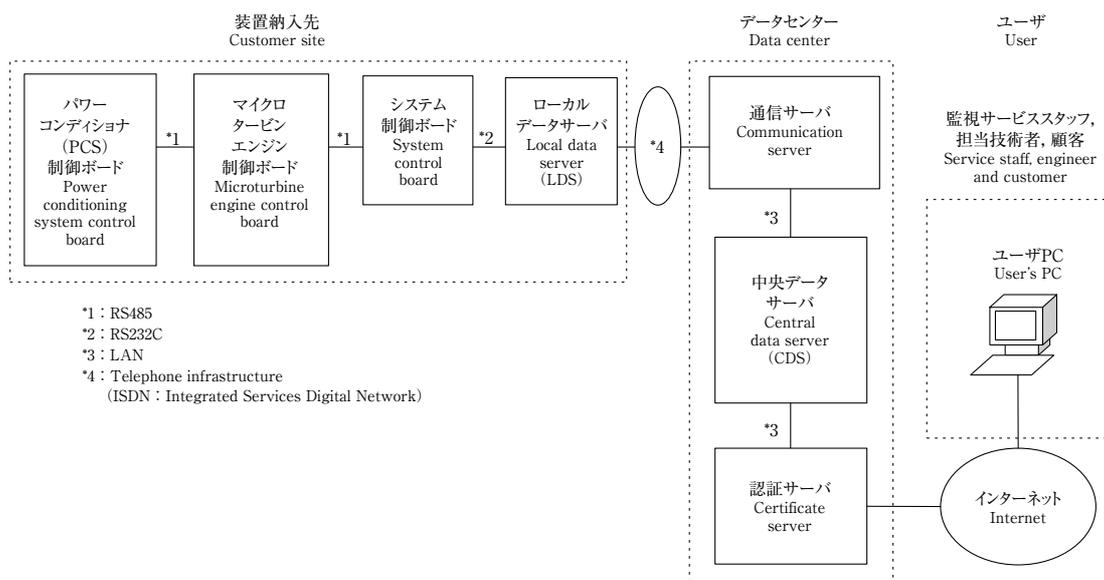


図1 遠隔監視システムのハードウェア構成

Fig. 1 Hardware configuration of the remote monitoring system

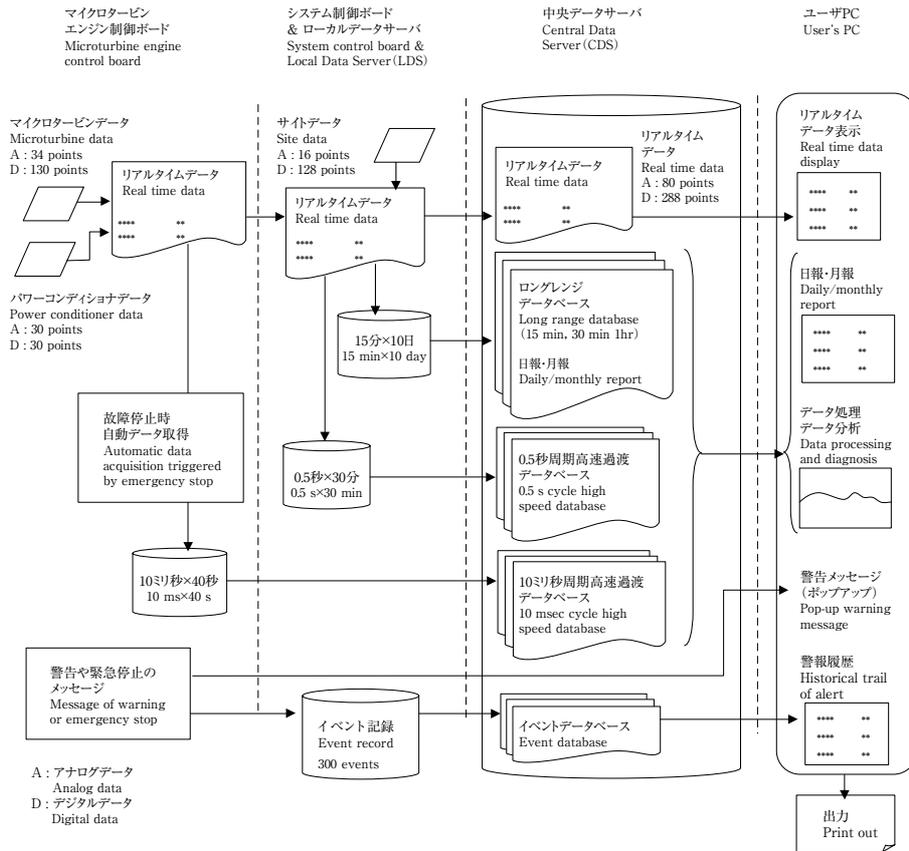


図2 遠隔監視システムのデータの流れ
 Fig. 2 Data flow of the remote monitoring system

らISDN回線，通信サーバを経由して，データセンターの中央データサーバ（CDS）に転送される。監視サービススタッフや担当技術者は，認証サーバを経由してCDSにアクセスしデータを閲覧することができる。また，契約された顧客もインターネット経由でCDSにアクセスすることができる。

遠隔監視システムのデータの流れを図2に示す。マイクロタービンのロータ回転速度，温度，圧力，パッケージ内部温度，PCSの発電出力，電流，電圧，温度，系統電圧，受電電力，燃料流量，温水流量，積算運転時間，積算発電電力量など，総計で80点のアナログデータ，288点のデジタルデータが収集される。マイクロタービンエンジン制御ボードでは，リアルタイムデータが10ミリ秒毎に更新されており，また緊急停止発生時には，事象発生前30秒間と発生後10秒間，合計40秒間の10ミリ秒周期の高速過渡データが自動的に保存される。また，システム制御ボードでは最新30分間の0.5秒周期の高速過渡データが，そしてLDSでは最新10日間の15分周期の長期データが保存され，常に更新されている。この長期

データから必要なデータが抽出され，日報・月報形式の帳票が作成される。更に，LDSでは，装置の起動停止や緊急停止の時刻，警報メッセージなど，最新の300事象を保存している。これらのデータは，基本的にオペレータが取得操作を行うことでCDSに転送・保存されるが，データによっては自動収集の設定も可能である。CDSのデータは，個々のPCにおいて汎用インターネットブラウザソフトで閲覧することができ，リアルタイムデータの監視，帳票の印刷，PCにデータを転送して分析することなどが可能である。

遠隔監視システムは，マイクロタービンコージェネレーションシステムで緊急停止などが発生した場合に，あらかじめ指定したパソコンに，自動的に事象の発生をポップアップで通報する機能をもっている。事象発生時には，監視サービススタッフと担当技術者が通報を受け，速やかにデータの収集と分析を行い，対策を決定する。彼らはまた，定期的に運用状況を確認し，データを分析して装置の健全性評価を行っている。

3. 高速過渡データを用いた故障診断事例

10ミリ秒及び0.5秒周期の高速過渡データは、緊急停止時の短時間の変化や起動状態の診断に適している。以下に高速過渡データを用いた故障診断事例を示す。

3-1 系統異常による停止

発電出力93 kWで運転中のマイクロタービンが、故障発報『ロータ加速度過大』により緊急停止した。停止前後1.2秒間の、10ミリ秒周期サンプリングの高速過渡データを図3に示す。系統電圧と発電出力は、PCS制御ボードからマイクロタービンエンジン制御ボードに送信されるデータであるため、他のデータより約70ミリ秒ほど遅れており、10ミリ秒周期の高速過渡データを分析するには、この遅れ時間を考慮する必要がある。図3から、ロータ加速度が突然上昇し、一旦低下した後再び上昇して、それから徐々に低下していることが分かる。また、ロータ加速度上昇とほぼ同時に燃料制御弁が閉じ、わずかに遅れて、発電出力が低下し、ロータ回転速度が上昇している。系統電圧と発電出力は移動平均処理が行われているため、データとしては階段状の変化を示しているが、実際の系統電圧と発電出力は急激に変化している。以上の状況は、全負荷しゃ断が発生した時の典型的な過渡トレンドを示している。この事例では、系統電圧が450 Vから400 Vへ一時的に低下していることから(図3)、系統電圧変動による緊急停止であると判断された。加えて、減速時のロータ回転速度の様子や潤滑油温度の変化などから、機械的な損傷がないことが確認できたため、ユーザに再起動可能の通知を行った。この緊急停止時に、現地では強い雷が発生していたとの報告があり、これが系統電圧変動の原因と推定される。

系統異常による緊急停止の他の例として、発電出力

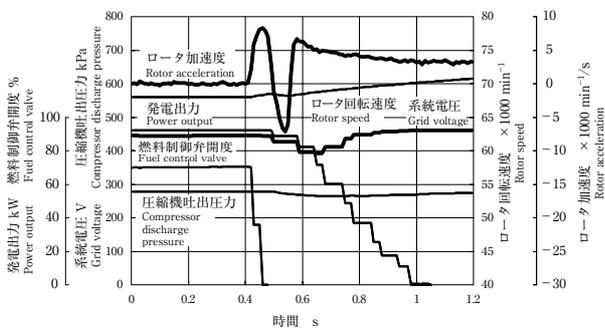


図3 系統電圧変動による緊急停止時の高速過渡データ
Fig. 3 High-speed transient data at shutdown due to utility voltage fluctuation

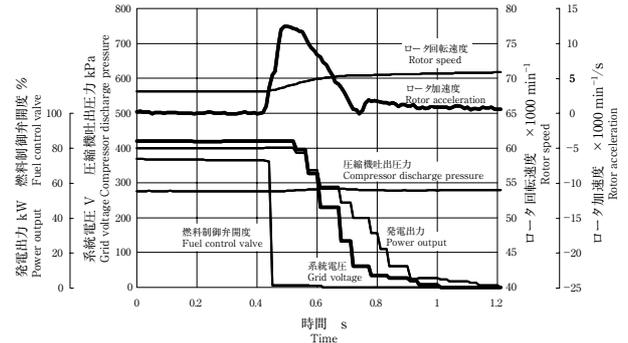


図4 系統異常(停電)による緊急停止時の高速過渡データ
Fig. 4 High-speed transient data at shutdown due to utility power failure

80 kWで連続運転中にロータ加速度が急変し、故障発報『ロータ加速度過大』により緊急停止した場合の高速過渡データを図4に示す。図3の例と同様に、ロータ加速度上昇と同時に燃料制御弁が閉じ、発電出力が低下し、ロータ回転速度が上昇している。この際、同時に系統電圧が低下して零になっていることから、停電による系統異常であることが分かった。マイクロタービンのPCSは、停電の場合に単独運転を検知する機能をもっているが、この場合は、その機能が作動するよりも先に加速度上昇を検知して緊急停止している。系統復電後、マイクロタービンは運転復帰した。

停電時の系統異常による緊急停止時のロータ回転速度と圧縮機吐出圧力の関係を図5に示す。ロータ回転速度は68000 min⁻¹の定常運転点から、全負荷しゃ断により70000 min⁻¹以上まで上昇し、その間、圧縮機吐出圧力はやや増加する。最大回転速度まで到達した後、ロータ回転速度と圧縮機吐出圧力はほぼ均等に、直線的に低下

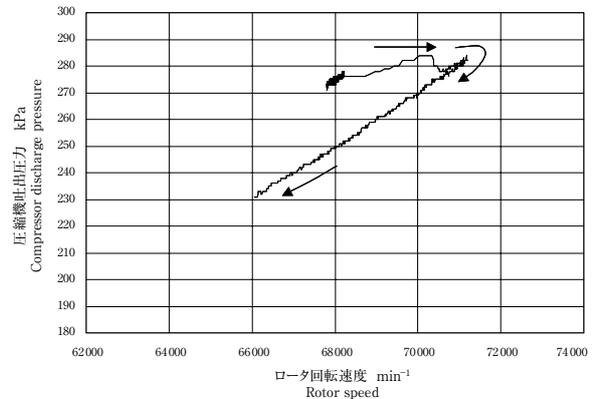


図5 系統異常(停電)による緊急停止時のロータ回転速度と圧縮機吐出圧力の関係
Fig. 5 Relationship between rotor speed and compressor discharge pressure at shutdown due to utility power failure

する。図5は緊急停止時の要因分析に有効であり、後節において他の緊急停止要因との比較を示す。

3-2 センサ信号異常による停止

発電出力80 kWで運転中のマイクロタービンが、故障発報『炎吹き消え』により緊急停止した。緊急停止前後の高速過渡データを図6に示す。ロータ加速度が急減し、同時に燃料制御弁が全開になり、すぐに全閉になっている。少し遅れて、発電出力が低下し、ロータ回転速度が増加している。制御ロジックにより、燃料制御弁が全開になったことが『炎吹き消え』と判断され、緊急停止した。この事例では、ロータ回転速度が瞬時に低下した後、復帰している様子が見られるが、その一方で、圧縮機吐出圧力にはロータ回転速度の低下に関連した変化が見られないことから、実際にはロータ回転速度は変化しておらず、ロータ回転速度信号の一時的な欠落が原因

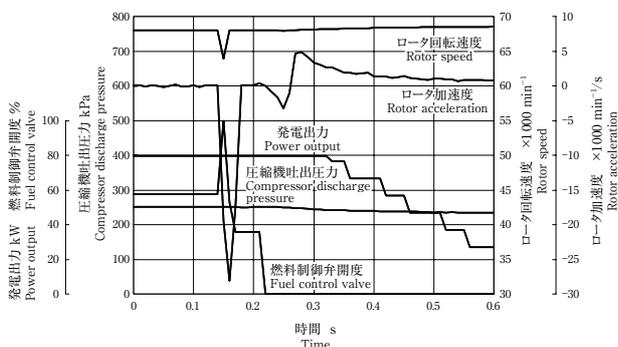


図6 ロータ回転速度信号異常による緊急停止時の高速過渡データ
Fig. 6 High-speed transient data at shutdown due to rotor speed sensor signal failure

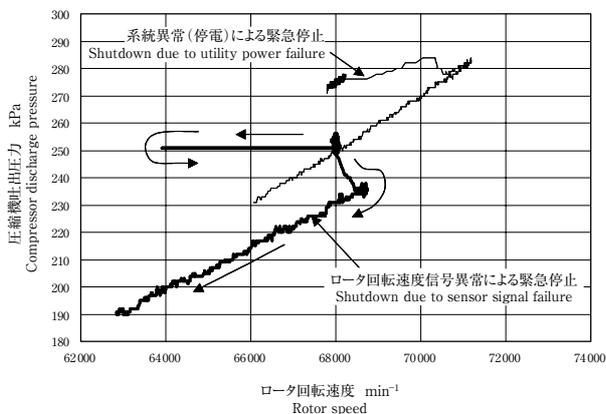


図7 ロータ回転速度信号異常による緊急停止時のロータ回転速度と圧縮機吐出圧力の関係

Fig. 7 Relationship between rotor speed and compressor discharge pressure at shutdown due to rotor speed sensor signal failure

であると考えられる。

図7にロータ回転速度と圧縮機吐出圧力の関係を示す。図7には、比較のため図5の例を細線で示してある。ロータ回転速度低下時に圧縮機吐出圧力は変化せず、またシャットダウン時にロータ回転速度はほとんど上昇せず、全負荷しゃ断とは明らかに異なる軌跡を描いている。

この場合も、機械的な損傷でないことが確認されたため、ユーザに再起動可能が通知された。更なる調査により、ロータ回転速度信号ケーブルとコネクタの接触不良がロータ回転速度信号の欠落の根本原因であることが判明したため、この現場を含め、運転しているすべてのマイクロタービンのケーブルを交換した。

3-3 圧縮機のストールによる停止

発電出力80 kWで運転中のマイクロタービンが、故障発報『ロータ加速度過大』により緊急停止した。緊急停止前後の高速過渡データを図8に示す。ロータ加速度上昇と同時に燃料制御弁が閉じ、発電出力が低下し、ロータ回転速度が一旦低下した後上昇している。この際、圧縮機吐出圧力が一時的に280 kPaから100 kPa近くまで急低下している様子が見られる。図9にロータ回転速度と圧縮機吐出圧力の関係を示す。定常運転点から、ロータ回転速度がわずかに増加しながら圧縮機吐出圧力が急低下し、その後ロータ回転速度の低下と共に圧縮機吐出圧力が回復するサイクルを描いている。図10に示す過去のデータとの比較により、この現象は圧縮機のストールによるものと判断された。図10の場合には、圧力低下を3回繰り返して停止している。一方、図9の場合には、強化された負荷しゃ断検知機能によって、初めの圧力低下で緊急停止し、機械的な損傷を未然に防止している。この場合、減速時のロータ回転速度、潤滑油温度の推移などのデータを分析した結果から再起動可能と判断

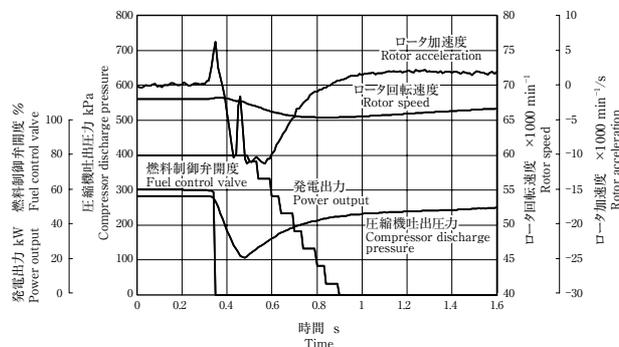


図8 圧縮機ストールによる緊急停止時の高速過渡データ
Fig. 8 High-speed transient data at shutdown due to compressor stall

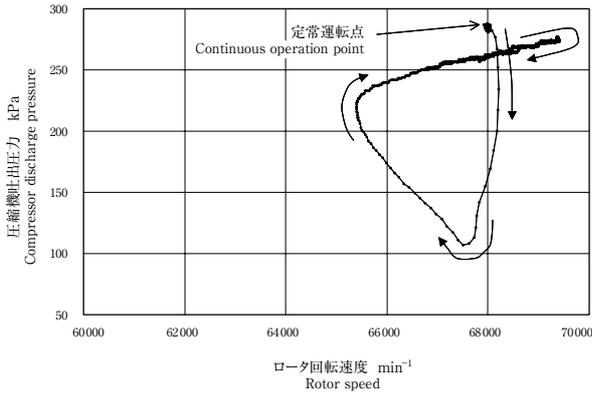


図9 圧縮機ストールによる緊急停止時のロータ回転速度と圧縮機吐出圧力の関係 (1)

Fig. 9 Relationship between rotor speed and compressor discharge pressure at shutdown due to compressor stall (1)

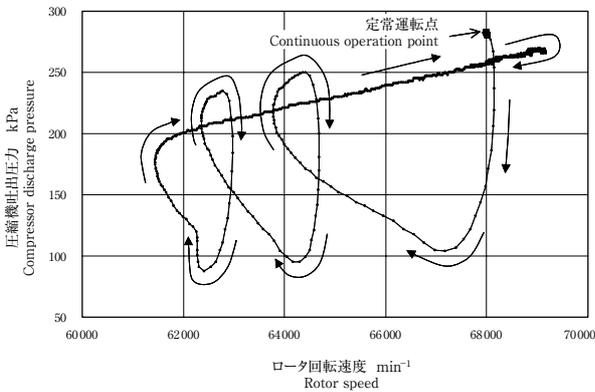


図10 圧縮機ストールによる緊急停止時のロータ回転速度と圧縮機吐出圧力の関係 (2)

Fig. 10 Relationship between rotor speed and compressor discharge pressure at shutdown due to compressor stall (2)

し、ユーザに通知して通常運転に復帰した。

3-4 起動プロファイルの改善

通常の冷間起動時の高速過渡データを図11に示す。ロータ回転速度 15000 min^{-1} で40秒間パージした後、燃料を供給して着火させ、 28000 min^{-1} で60秒間保持した後、定格ロータ回転速度 68000 min^{-1} まで昇速した。その後、発電出力が定格負荷まで上昇した。

図12は好ましくない冷間起動の例である。定格回転速度までの加速中に、タービン排気温度が 450°C に達しており、燃料供給過多が懸念された。遠隔操作で起動制御パラメータの調整を行ったが、状況は改善しなかった。現地での検査により、マイクロタービンと再生器のインターフェースからの圧縮空気漏れが原因と判断し、再生器を交換した。

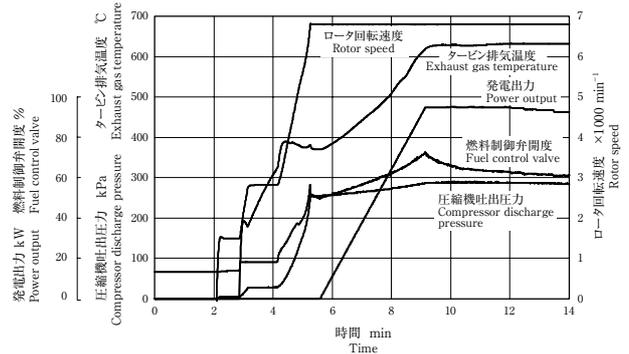


図11 通常の冷間起動時の高速過渡データ

Fig. 11 High-speed transient data of typical cold start

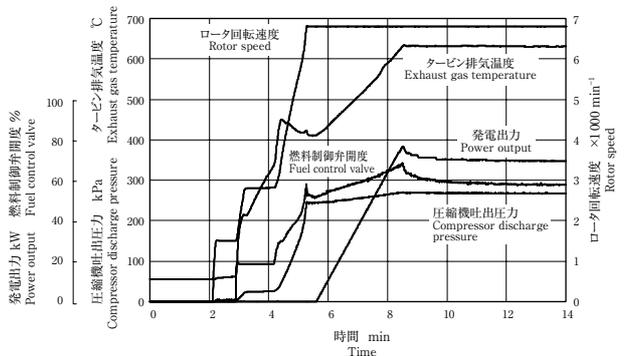


図12 好ましくない冷間起動時の高速過渡データ

Fig. 12 High-speed transient data of undesirable cold start

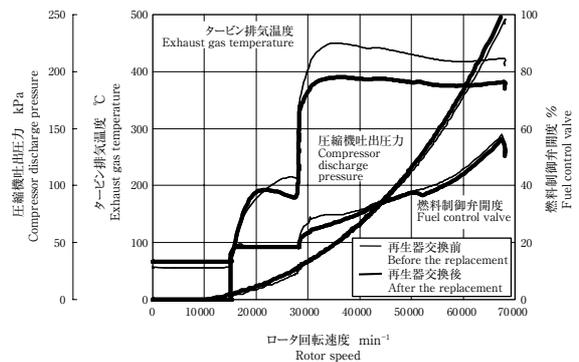


図13 再生器交換前後の冷間起動データの比較

Fig. 13 Comparison of start profile before and after recuperator replacement

再生器交換前後の起動データの比較を図13に示す。比較を容易にするため、横軸をロータ回転速度にして、縦軸に燃料制御弁開度、タービン排気温度、圧縮機吐出圧力を示している。再生器交換後は、ロータ回転速度が 28000 min^{-1} から 68000 min^{-1} まで加速する間の燃料制

御弁開度が全体的に低下しており、タービン排気温度が全体にわたって50℃低下して正常範囲に入っている。また圧縮機吐出圧力が全体的に高くなっており、圧縮空気漏れが改善されたことが伺える。

4. 長期データを用いた故障予知事例

長期データは15分、30分あるいは60分の間隔で取得でき、データの推移を分析することで、経年による機器の不調を事前に予知することが可能となる。以下に長期データを用いた故障予知事例を示す。

4-1 性能の低下

某所にて稼働中のマイクロタービンの発電出力と吸気温度の約2箇月にわたる長期トレンドを図14に示す。発電出力は吸気温度の影響を受けるため、日毎に変化しながら緩やかに推移しているが、特段の問題はないように見える。これを横軸に吸気温度、縦軸に発電出力をとって

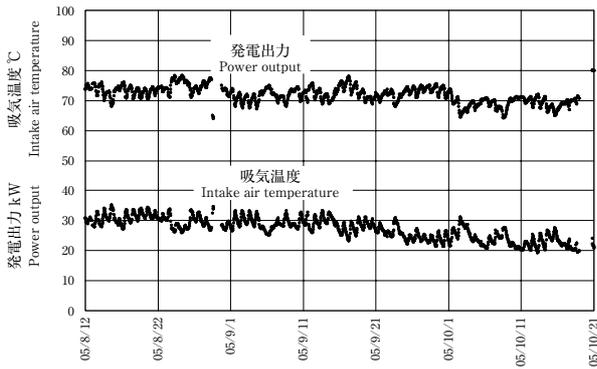


図14 発電出力と吸気温度の長期トレンドデータ

Fig. 14 Long-range trend data of power output and intake air temperature

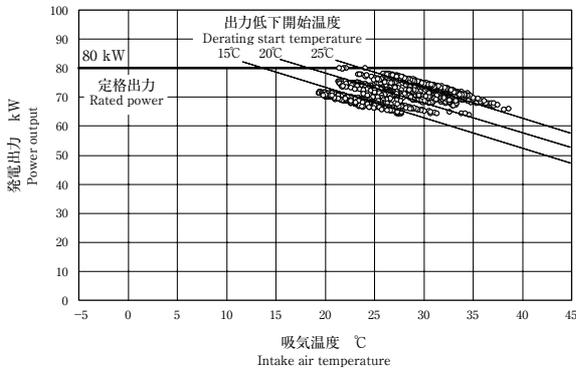


図15 発電出力と吸気温度の関係

Fig. 15 Relationship between power output and intake air temperature

示すと図15のようになる。ガスタービンは、吸気温度が上がると発電出力が下がる、いわゆる出力低下特性をもつため、データは右下がりの傾向を示している。しかし、通常は一つの線に沿って分布するはずのデータが、広い範囲に分布している様子が見られる。この分布傾向を時系列で分析するために、出力低下の傾きを一定として個々のデータから出力低下開始温度を計算で求めた。図16は出力低下開始温度の長期トレンドを示す。途中まで、出力低下開始温度は25℃前後の一定値を保持しているが、ある時点から明確な低下傾向を示しており、1箇月後には15℃以下になっている。総合的な分析から、燃焼器の劣化が予想されたため、マイクロタービンを計画停止して点検を実施し、劣化した燃焼器の交換を行った。燃焼器交換後はマイクロタービンの性能が回復した。

4-2 潤滑油圧力減少

某所にて稼働中のマイクロタービンの潤滑油圧力と潤滑油供給温度の、約1年間にわたる長期トレンドを図17

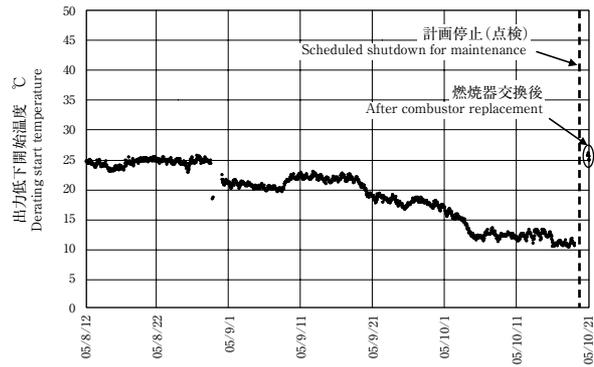


図16 出力低下開始温度の長期トレンドデータ

Fig. 16 Trend of derating start temperature

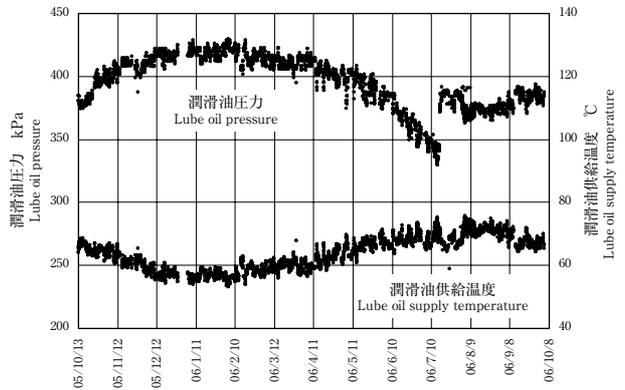


図17 潤滑油圧力と潤滑油供給温度の長期トレンドデータ

Fig. 17 Long-range trend data of the lube oil pressure and lube oil supply temperature

に示す。潤滑油の温度と圧力は調節弁によってある程度制御されているが、長期的には吸気温度の影響を受けて変化する。すなわち、潤滑油供給温度が冬季は下がり、夏季は上がるため、潤滑油圧力は逆に冬季に高く、夏季に低くなる。図17は冬季から夏季にかけて潤滑油圧力が緩慢に低下しているのを示しており、特に異状はないように見受けられる。これを、横軸に潤滑油供給温度、縦軸に潤滑油圧力をとると、図18のように示される。潤滑油供給温度と圧力は本来リニアな関係にあるため、データは一直線上に分布すると考えられるが、図18には広い分布が示されている。この分布傾向を時系列で分析するために、圧力低下の傾きを一定として、個々のデータから潤滑油供給温度60℃で正規化した潤滑油圧力を計算で求めた。図19は正規化潤滑油圧力の長期トレンドを示す。ほぼ一定で推移していた正規化潤滑油圧力が、ある時点から低下傾向を示しているのが明確に分かる。潤滑油タンク内の潤滑油量減少と潤滑油の泡立ちによる潤滑油圧力の低下が予想されたため、低下傾向を示してから約1箇月半後にマイクロタービンを計画停止し、潤

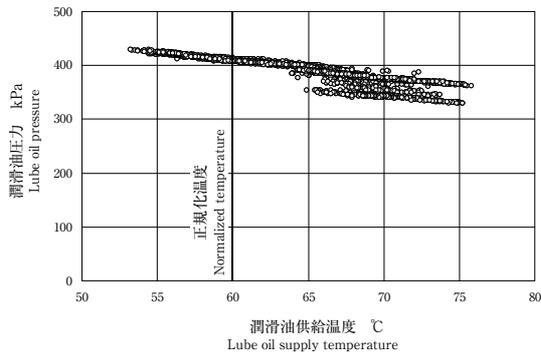


図18 潤滑油圧力と潤滑油供給温度の関係

Fig. 18 Relationship between lube oil pressure and lube oil supply temperature

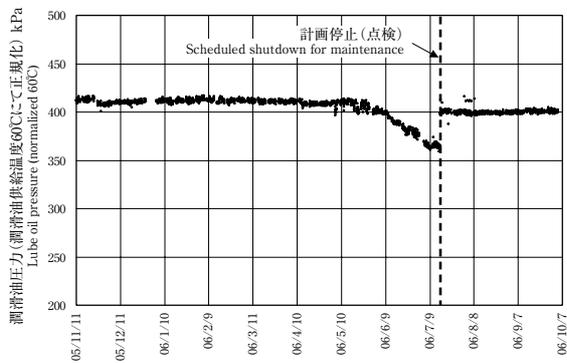


図19 正規化潤滑油圧力の長期トレンドデータ

Fig. 19 Trend of normalized lube oil pressure

滑油の補充と潤滑油シール用空気バッファラインの清掃を行った。整備後、圧力は回復し、一定値を保持するようになった。

4-3 潤滑油の冷却

某所にて稼働中のマイクロタービンの潤滑油供給温度と潤滑油戻り温度、吸気温度の約3箇月にわたる長期トレンドを図20に示す。潤滑油供給温度は吸気温度の影響を受けて変化する、潤滑油供給温度と潤滑油戻り温度の差は軸受や発電機に異状がなければほぼ一定を保つ。図20に示された各温度はほぼ一定の関係をもって推移しており、特に問題は無いように見受けられる。これを、横軸に吸気温度、縦軸に潤滑油温度をとると図21のようになる。潤滑油供給温度と潤滑油戻り温度とも、ほぼ一直線上に分布しているが、それぞれ約10℃高い位置に分布しているグループが存在することが分かる。この分布傾向を時系列で分析するために、傾きを一定として個々のデータから吸気温度15℃で正規化した潤滑油温度を計算で求めた。図22は正規化潤滑油温度の長期ト

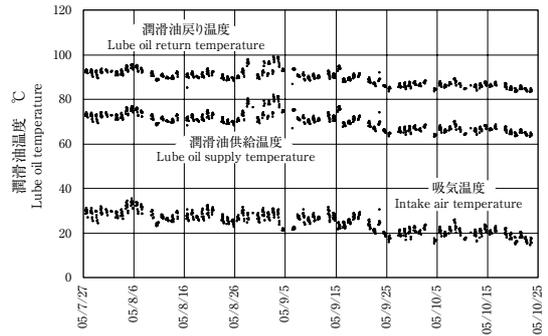


図20 潤滑油供給温度と潤滑油戻り温度の長期トレンドデータ

Fig. 20 Long-range trend data of lube oil supply temperature and lube oil return temperature

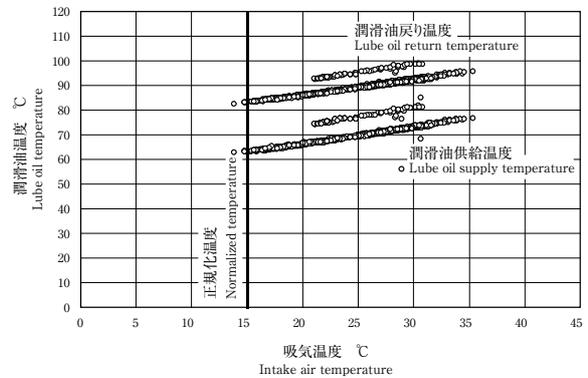


図21 潤滑油供給温度、潤滑油戻り温度と吸気温度の関係

Fig. 21 Relationship between lube oil supply temperature, lube oil return temperature and intake air temperature

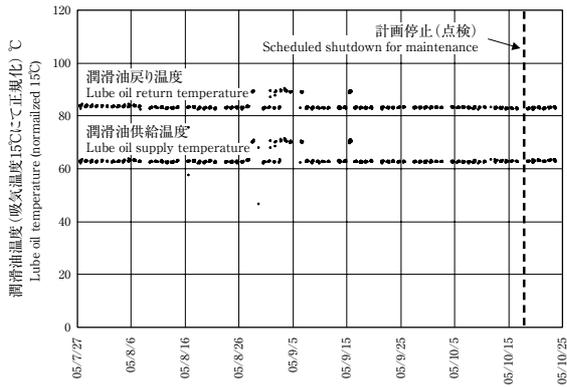


図22 正規化潤滑油温度の長期トレンドデータ
Fig. 22 Trend of normalized lube oil temperature

トレンドを示す。ほぼ一定値で推移している正規化潤滑油温度が、ある時期だけ高い値を示していることが分かる。また、潤滑油供給温度と潤滑油戻り温度の両方が同時に変化していることから、軸受や発電機の問題ではなく、潤滑油冷却系の問題と予想された。そこで運転休止日に点検を行い、潤滑油クーリングファンドライバに劣化が確認されたため交換した。

5. まとめ

遠隔監視システムの構築により、各サイトで稼動するマイクロタービンコージェネレーションシステムの様々なデータの獲得と保存が可能となり、遠隔監視データを用いた

故障診断や故障予知が有効に実践されるようになった。

著者らは10ミリ秒周期の高速サンプリングデータを用いた故障診断の手法を考案した。各種の故障診断事例が蓄積されることによって、緊急停止時の再起動可否判断が迅速に行われるとともに、対処が必要な場合には故障原因をデータから分析し、対処内容を絞り込むことにより装置停止時間の短縮を行い、マイクロタービンコージェネレーションシステムの稼働信頼性向上に貢献している。また、15分周期で獲得した長期間トレンドデータを用いた正規化手法を提案し、機器の劣化の進行が明確に把握できるようになった。このことにより、機器の故障予知やオン・コンディション・メンテナンスの可能性が上げられた。以上のようなデータ分析を行うことにより、マイクロタービンコージェネレーションシステムは99.5%を超える年間平均稼働信頼性と起動信頼性が達成されている。

マイクロタービンは複雑な機器で構成された発電装置であるが、運転状態の変化は明確にデータ上に現れる。今後も分析手法の改良や新規考案を行い、遠隔監視に基づく不適合発生前での整備を推進することで、更なる信頼性向上を目指していく所存である。

参考文献

- 1) Kataoka,T., Nakajima,T., Sakata,S., Kishikawa,T., ASME Turbo Expo 2007, Montreal, GT2007-27697.