

IoTを活用したモータ診断システム

Diagnostic System for Motor Equipment Using Internet of Things

要 旨

工場や上下水道プラント、発電所などで使用されるモータ設備に関しては、故障停止による被害が甚大になることから定期的な点検作業を実施している。敷地内に点在するモータ設備に対して巡視点検が必要になることから、点検作業には多大な時間を必要としている。また、点検には音やにおい等、熟練作業者の五感に頼るノウハウによって点検される場合も多いが、少子高齢化が進み、熟練作業者の不足も問題の一つとして挙げられる。

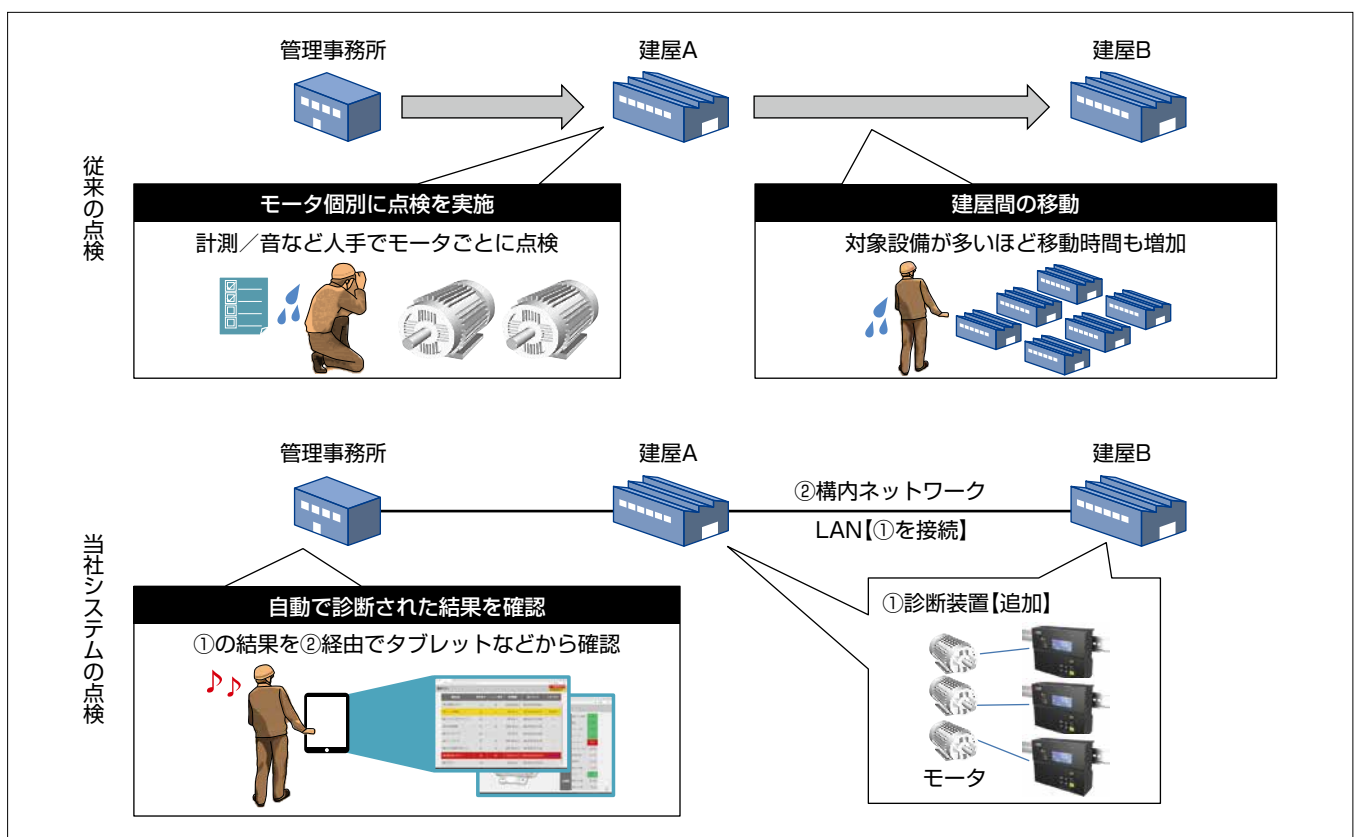
三菱電機は、これらの問題を解決するため、オンラインで自動でモータ設備を診断するシステムを製品化した。この製品は、独自解析アルゴリズムで、モータ設備稼働中の電流／電圧情報からモータの異常発生前に兆候を検出する。

このシステムによって、自動でモータ故障要因の約68%

に当たる次の異常を事前に検出することが可能になるため、経済的かつ熟練作業者のノウハウに依存しない点検（診断）が可能になり、設備の安定稼働を実現する。

- (1) 機械系異常(異常振動／軸受損傷, 回転子バー切れ, ベルト断線)
- (2) 電気系異常(レヤショート)
- (3) 負荷設備異常(負荷トルク異常)

この製品には既存のモータ設備へ簡単に追加可能な簡易設置モータ診断装置と、当社モータコントロールセンタに搭載しているモータ診断機能付きマルチコントローラの2種類の診断装置を用意しており、ユーザーのニーズに合った製品選択を可能にしている。



従来と今回開発の診断システムによる点検のイメージ

従来の点検では、敷地内のモータ設備それぞれに対して移動／点検を実施していたが、①診断装置をモータごとに設置し、②構内ネットワークLANに接続しておくことで、タブレットやパソコンから①の診断結果を②経由でいつでも確認することが可能になる。

1. ま え が き

主に発電設備や産業プラントなどで使用される低圧三相モータは工場のファン、ポンプ、ベルトコンベアなど様々な設備の動力を担う主要機器であり、生産性の維持・向上のため、安定した連続運転性能に加えて、メンテナンスの効率化・省力化が求められている。また、少子高齢化などによって点検に必要なノウハウを持った熟練作業者が不足している。

当社はこれまでモータ設備を監視するためのモータコントロールセンタ(MCC)を製品化している。これまでの技術を集約して独自アルゴリズムを開発し、稼働中のモータ設備情報から異常発生前の兆候を検知することが可能になった。この技術を応用し、簡単にモータ設備の診断を行うシステムを製品化したことによって、巡視点検時間の削減や熟練作業者のノウハウに依存しない安定的な設備点検(診断)が可能になる。

2. モータ診断技術

2.1 電流/電圧情報によるモータの診断

工場やプラントなどで最もよく使用されるかご形誘導機がこの診断システムの対象になる。このモータは、①固定子(固定子巻き線と鉄心)②回転子(回転子バーと鉄心)及び③軸受から構成される。モータや、それにつながる負荷やベルトを診断する監視項目として、一般的には振動を計測することが多い。しかし、従来のメンテナンスは、人手が必要で、常時の診断は難しいという問題があった。

そこで、低コスト、自動、かつオンラインで設備の診断を行うことに着目し、比較的容易に取得可能な電流/電圧情報の解析から、モータ特有の信号を抽出することで効率的なモータ設備の診断を可能にした。

2.2 診断項目

モータ診断システムで診断が可能な項目とその検知方法を表1に示す。診断する項目は主に5種類(①異常振動/

表1. 診断項目と検知方法

故障種別	故障内容	検知方法
機械系異常	①異常振動/軸受損傷	電流の回転周波数成分 軸受固有周波数成分
	②回転子バー切れ	電流の回転子バー切れ成分
	③ベルト断線	電流のベルト断線成分
電気系異常	④レヤショート (固定子巻線ターン間短絡)	逆相電流・電圧
負荷設備異常	⑤負荷トルク異常(過負荷)	トルク推定値

軸受損傷②回転子バー切れ③ベルト断線④レヤショート(固定子巻き線ターン間短絡)⑤負荷トルク異常)である⁽¹⁾。設備が停止するより前に、これらの異常発生やその種類を把握できる。それぞれの故障を検知するための技術について述べる。

2.2.1 異常振動/軸受損傷の検出方法

電源の周波数を f_s (Hz)、極対数を p 、また回転磁界の速度と回転子の回転速度の差の割合であるすべりを s とすると、回転子の回転周波数 f_r (Hz)は式(1)で表される。

$$f_r = \frac{1-s}{p} f_s \dots\dots\dots (1)$$

モータと負荷の間に芯のずれ(ミスアラインメント)や、ベルトの緩み、偏心、異常な振動、軸受の損傷があると、その程度の大きさによって、周期的にトルクの高さや電流の流れやすさが変わる。そのため、電流には電源の周波数成分(50Hz又は60Hz)だけではなく、異常の兆候が側帯波として現れる⁽²⁾。図1(a)と図1(b)に、正常時と異常時の電流解析結果の例を示す。回転速度に同期した振動に対応して、異常時には式(2)で表される電流の回転周波数成分 f_m (Hz)が増加する。

$$f_m = f_s \pm f_r \dots\dots\dots (2)$$

また、この周波数成分だけではなく、軸受の形状(内輪、外輪、玉など)を考慮した、軸受固有の周波数成分もモータ診断システムで監視する。そのため、不具合を特定し、設備が停止する前に対策を取ることができる。

図2に、軸受の加速劣化試験結果を示す。軸受に異物を混入してモータを運転させ、軸受の劣化を進行させた。このとき、電流の回転周波数成分が時間と共に増加しており、異常を示す兆候として有用であることを確認した。

2.2.2 回転子バー切れの検知方法

回転子には、電流が流れる回転子バーがあるが、運転を続けるとバーに損傷や切れが発生することがある。このとき、電流値の増加や過熱、また部品が飛散するおそれがあるため、この現象を早期に検知する必要がある。

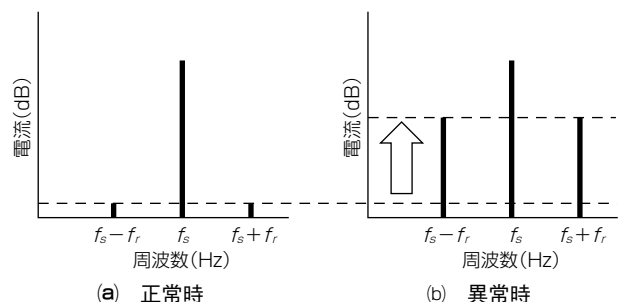


図1. 電流から異常兆候を得る原理

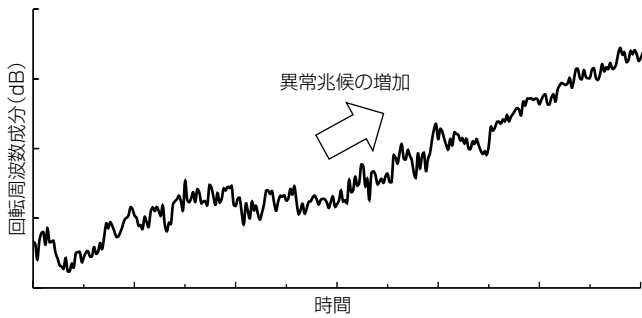


図2. 軸受の加速劣化試験結果

回転子バーに切れがあると、バーや固定子巻き線の電流の流れ方が変化する。電源周波数を f_s (Hz)、すべりを s とすると、式(3)で表されるバー切れ成分 f_{bar} (Hz)が増加する。

$$f_{bar} = (1 \pm 2s)f_s \dots\dots\dots (3)$$

図3に、正常時と、回転子バー切れを1本発生させた異常時について、回転子バー切れ成分を比較した結果を示す。着目している $(1-2s)f_s$ や $(1+2s)f_s$ の周波数成分は、どちらも異常時の方が約10dB大きい。そのため、この側帯波を監視することで、回転子バーの切れを1本から検出できることを確認した。

2.2.3 ベルト断線の検出方法

ベルトがある場合、ベルトが回転する周期で電流が変動する。ベルトが回転する周波数 f_{belt} (Hz)は、式(4)で表される。ここで、モータプリー半径を D (m)、ベルトの長さを L (m)、回転子の回転周波数 f_r (Hz)としている。

$$f_{belt} = \frac{2\pi D}{L} f_r \dots\dots\dots (4)$$

このとき電流には、ベルトが回転する周波数だけ電源周波数からずれた式(5)で表される側帯波が、特徴として現れる。ここで、 k は正の整数を表す。

$$f_c = f_s \pm k \cdot f_{belt} \dots\dots\dots (5)$$

ベルトが断線した場合は、理論上電流へのベルト成分

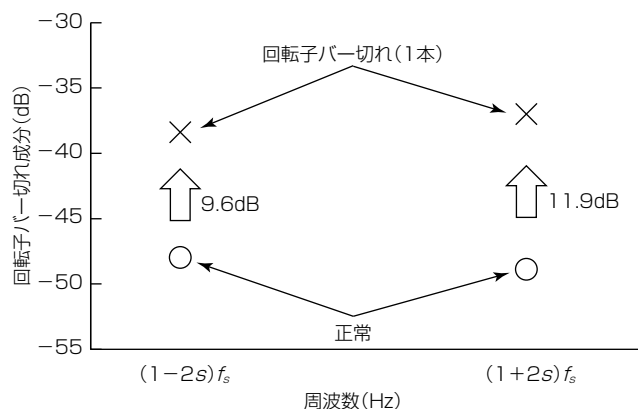


図3. 回転子バー切れ試験結果

の影響がなくなる。このように、電流を解析することで、モータだけでなく設備全体の状態を監視できる。

2.2.4 レヤショートを検出方法

固定子の巻き線には、フレームに通電しないように絶縁処理が施されているが、熱や傷が原因で短絡や地絡が発生することがある。同じ相の中で数ターンの短絡(レヤショート)があると、その短絡部でループする電流 i_r が流れる(図4)。しかし、ループする異常な電流があっても、三相の電流が増加しなければ、リレーでは保護できない。ループする電流は、モータの過熱や更なる短絡を引き起こすため、早期に検出する必要がある。

そこで、U、V、W相に流れる電流のわずかなアンバランスとして、逆相成分を解析する⁽³⁾。また、レヤショートがなくとも、逆相電圧によっても逆相電流は発生するので、その影響を補正したレヤショート評価値を用いている。図5に、巻き線の短絡数を調整し、そのときの逆相電流を解析した結果を示す。巻き線を1ターン短絡させたときの変化は微小だが、6ターンの短絡からはレヤショート評価値が大きく増加している。このように、逆相成分を解析することでレヤショートが検出できることを確認した。

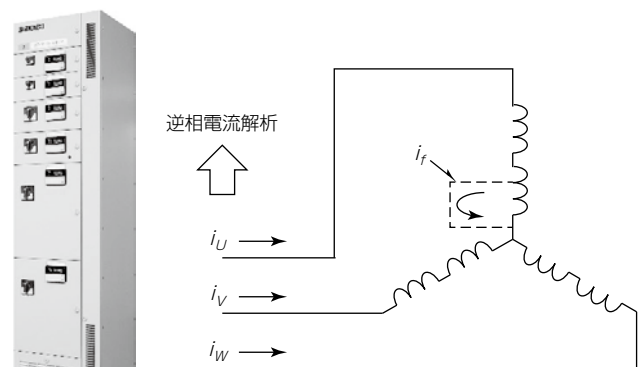


図4. レヤショート時の回路図と検出方法

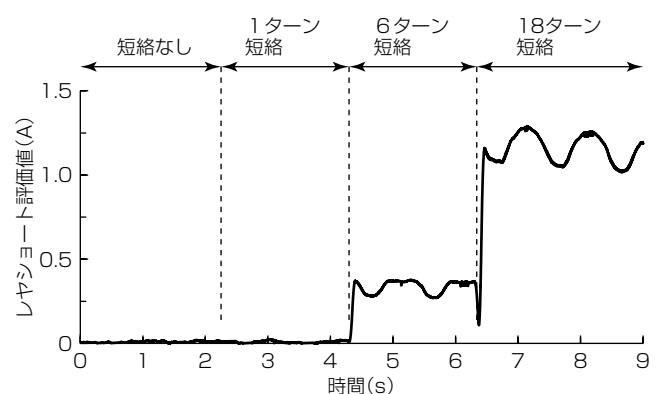


図5. 固定子巻き線レヤショート試験結果

2.2.5 負荷トルク異常の検出方法

配管・フィルタのつまりなど、モータにつながる負荷に異常があると、通常時と比べてモータのトルクが変化する。トルクは、電流と電圧データだけから計算して推定するため、特殊なセンサを追加することなく設備を監視することが可能になる。モータが出力するトルク $T(N \cdot m)$ は、極対数を p 、二相に換算した固定子上の電流を i_α, i_β 、固定子の巻き線を通過する磁束を Φ_α, Φ_β とすると式(6)で表される。

$$T = p(\Phi_\alpha i_\beta - \Phi_\beta i_\alpha) \dots\dots\dots (6)$$

正常時のトルク値を学習して、トルクが増加又は減少したことを検出するためのしきい値を設備ごとに設定できる。

3. システム構成

敷地内での複数のモータ設備の診断を自動的に行い、結果を一括管理するためのシステムであり、診断装置(図6の(1)-1と(1)-2)、ゲートウェイ(図6の(2))、監視ディスプレイ(図6の(3))の3種類の機器で構成する。

3.1 診断装置

設備の状況に応じて柔軟に対応できるように、2種類の製品ラインアップを設けている。

3.1.1 簡易設置診断装置“DiaPro Motor”

既存モータ設備に対して、診断機能だけを追加する場合は、図6の(1)-1に示す簡易設置診断装置DiaPro Motor(以下“DP”という。)を設置することでモータ診断が可能になる。DPは電流信号だけで稼働中のモータのレヤショート異常と機械系異常の予兆検出が可能になる。

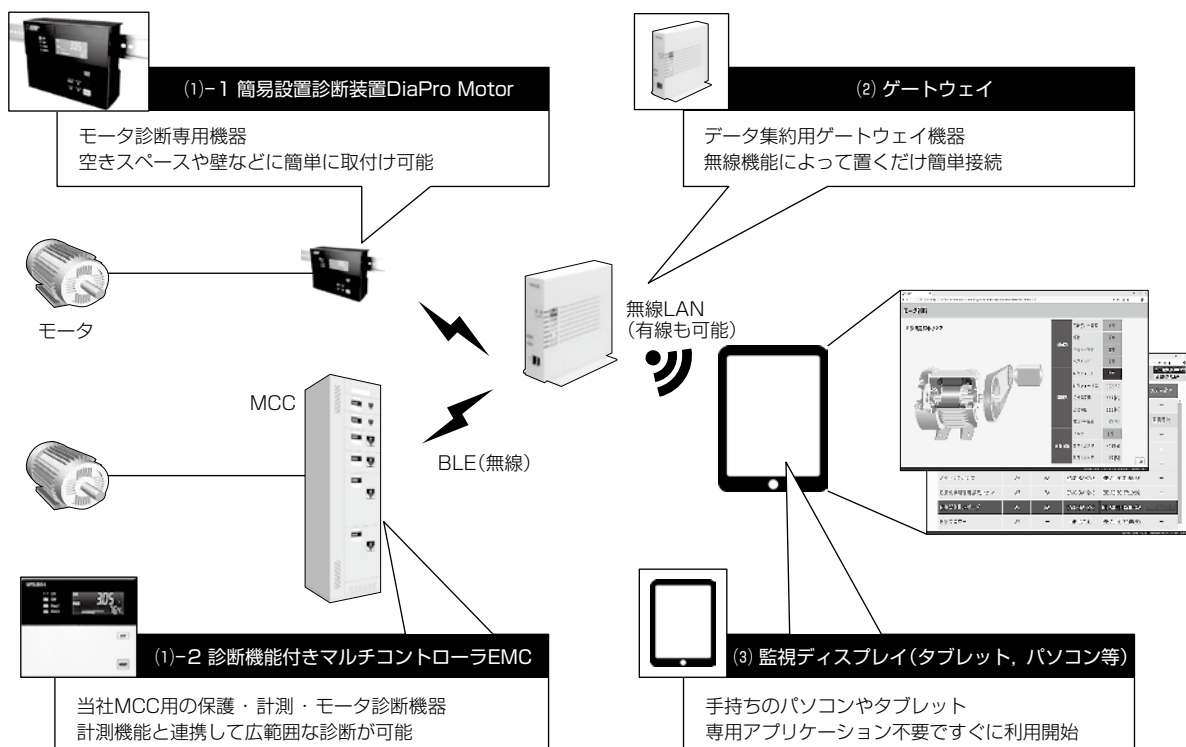
DPは既存設備へ簡単に追加可能な点を特長にしている。具体的には、計測電流の取得方法にクランプ式を採用し、配線変更などを不要にしている。また、取付け方法もDINレールやねじ止めが可能のため、様々な場所に取り付けることができる。図7にDPの外形寸法を示す。

3.1.2 診断機能付きマルチコントローラ“EMC”

MCCを新設/更新する場合は、当社MCCの導入によってモータ診断が可能になる。また、既に当社MCCを導入している場合は、ユニットの交換によってモータ診断が可能になる。

当社MCCは、図6の(1)-2に示す計測・保護・モータ診断機能を持ったマルチコントローラEMCが取り付けられている。

EMCは計測・保護機能が備わっている点と、電流/電圧情報を使用することでDPでは検出できない負荷トルク異常の予兆も稼働中に検出することが可能な点が特長になっている。また、当社MCCは1面当たり最大40ユニット



BLE : Bluetooth Low Energy, EMC : Electronic multi-function Motor Controller

図6. システム構成

ト収納可能になり、省スペース化へ貢献する。表2にDPとEMCでの比較を示す。

3.2 ゲートウェイ

診断装置によって、モータ設備の自動診断が可能だが、図6の(2)に示すゲートウェイを設置することで点在す

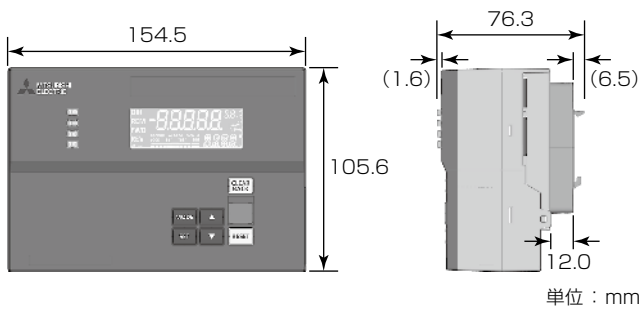


図7. DPの外形寸法

表2. DPとEMC比較表

機能項目	DP	EMC
計測機能	×	○
保護機能	×	○
診断機能	負荷トルク異常検出	×
	レヤショート検出	○
	機械系異常検出	○
取付け場所	盤内空きスペース や壁付け	当社MCC盤面

るモータ診断情報を最大40台分集約できる。ゲートウェイと診断装置間はBLE通信(無線)、ゲートウェイとタブレット(パソコン等)間は無線LAN通信が可能のため、配線レスで設置後、即座に情報を収集できる。また、ゲートウェイはルータ機能も搭載しているため、構内ネットワークLANに接続することで現場やオフィスなどでいつでも診断結果を確認できるようになる。また、セキュリティ対策として、簡易的なファイアウォール機能も搭載されており、不要な通信や接続をブロックすることも可能である。さらに現場設置を想定し、電源AC100-240V、DC24V対応に加えて動作温度-20~55℃、防塵(ほうじん)防水IP53対応モデルもラインアップしている。

3.3 監視ディスプレイ

診断結果を表示するための監視ディスプレイとして図6の(3)のように汎用的なタブレットやパソコン等を使用できる。また、専用アプリケーションを不要としており、ブラウザ経由でゲートウェイのURL(Uniform Resource Locator)にアクセスすることで簡単に診断結果を確認できる。診断はDPやEMC内で実施しており、データ集計と表示画面作成はゲートウェイで実行しているため、タブレット(パソコン等)への負担は少なく、比較的低スペックの端末でもストレスなく設備状況を把握することが可能になっている。次に図8に示す監視画面について述べる。

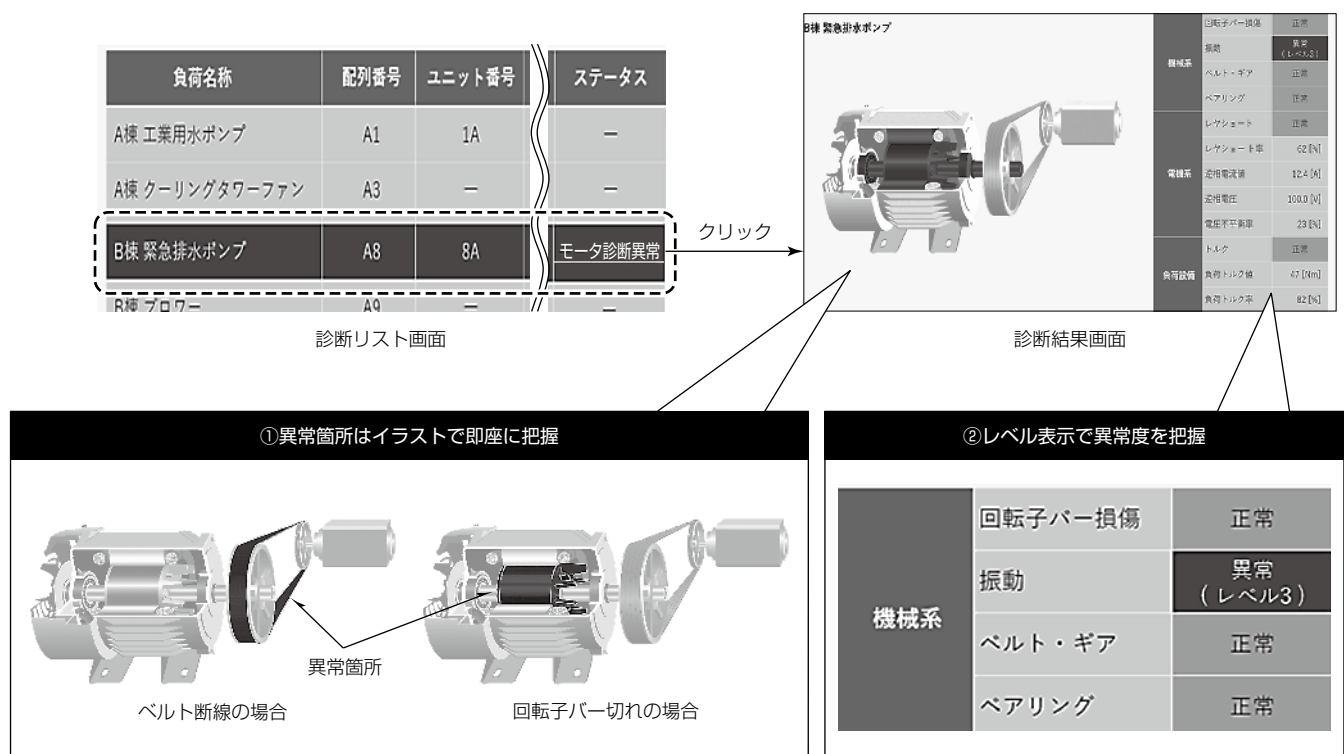


図8. 監視画面

表3. 振動異常レベルの目安

レベル	目安
1	通常運転とは異なる差異(異常)を検知
2	異常の兆候が進展
3	異常が更に進展しており、故障の可能性が高い

表4. 点検時間の削減効果

項目	従来の点検	自動診断 (今回開発システム)
点検時間	20分	0分
結果確認時間		10分
巡視時間	30分	0分
年間合計時間	216時間	43時間

80%以上の削減

3.3.1 診断リスト画面

モータ設備内の状況を一覧表示しており、異常発生時は、リストの背景色を変更してユーザーに通知する。異常の種類は2種類あり、診断結果の異常(赤背景)項目又は通信が途絶えている(黄色背景)項目を通知する。診断結果の詳細を確認するためには、該当項目をクリックすることで、診断結果画面へ遷移する。

3.3.2 診断結果画面

診断結果画面ではイラストとリストでモータ個別の診断結果を表示する。イラストでは、モータの異常箇所を塗りつぶしていることで視覚的に異常箇所を把握できる。リストでは、各異常項目に対して異常有無を一覧表示している。異常の兆候にばらつきが多い機械系の振動異常については異常レベルを数値化することで、ユーザーは異常度合いを把握できる。これによって、モータ設備の事故発生前にメンテナンスや交換が可能になり、事故を未然に防止する。振動異常のレベルは表3の目安を設けている。

また、異常検出感度は低・中・高と診断装置ごとに設定できるため、モータ設備の重要度に合わせて検出時期を調整することも可能になっている。

4. 導入効果

このシステムを採用した場合の導入効果を試算する。このシステムはモータ設備の点検効率化と事故による被害を抑えることが可能になる。

4.1 点検時間の削減効果

点検するモータ台数を10台、毎週5日間を1年間(52週)点検する場合を想定する。従来の点検では、点検時間を2分/台、移動時間を3分/台と仮定し、このシステムによる点検では毎日ブラウザから結果を確認する時間を1分/台としたときの効果を表4に述べる。

このシステム導入によって、80%以上の削減効果を見込むことができる。また、システムが自動でモータ設備を診断することで一定の精度で異常を検出することが可能になる。

表5. 事故被害の抑制効果

項目	故障原因比率	DP	EMC
軸受不良 (機械系異常)	32.5%	○	○
絶縁劣化 (レヤショート)	20.5%	○	○
過負荷 (負荷トルク異常)	15.1%	×	○
単相運転	12.1%	×	△
断線	6.9%	×	△
冠水	7.1%	×	△(注1)
外的衝撃	5.7%	×	△(注1)
故障原因カバー率		53.0%	68.1%

○：異常兆候検出可能 △：故障時に保護可能 ×：防止不可
(注1) 故障のケースによっては検出できない可能性あり

4.2 事故被害の抑制効果

一般社団法人 日本電機工業会の報告資料⁽⁴⁾から引用した電動機の故障原因比率に対して、事故被害の抑制効果を表5に示す。

このシステムを導入することで、DPは約53.0%の故障原因をカバーすることが可能であり、EMCは約68.1%をカバーすることが可能である。また、EMCは故障時の保護を含めると故障のケースによって検出できない可能性もあるが、全ての故障項目を防止することが可能になる。

5. むすび

モータ設備に対する当社独自の診断技術とそれを応用した製品について述べた。今後は、更に効率のかつ安定的なモータ設備の稼働ができるように機能拡充などを進めていく。

参考文献

- (1) 金丸 誠, ほか: 電気信号情報を活用したモータ設備の異常検知技術, 三菱電機技報, 93, No.6, 339~342 (2019)
- (2) 金丸 誠, ほか: 固定子電流パワースペクトルの特徴周波数監視による電動機軸受の異常検出技術, 電気学会論文誌D(産業応用部門誌), 137, No.10, 799~805 (2017)
- (3) 金丸 誠, ほか: 逆相電流電圧解析による電動機固定子巻線短絡検出の高精度化, 電気学会論文誌D(産業応用部門誌), 137, No.1, 17~23 (2017)
- (4) 一般社団法人 日本電機工業会: 誘導電動機の更新推奨時期について, 電力・産業システム 9209 (2000)