三相モータの故障予兆検知システム

(株)コンテック　技術本部　開発企画グループ　日比野　一茂

工場設備や社会インフラ設備には、数多くの三相誘導電動機が使用され私たちの生活を支えている。これらの電動機の中には、ガスや水道などの安定供給や工場の生産設備稼働のため欠かせない重要な役割を担っているモータも多くあり、もし故障などの障害が発生した場合は、私たちの生活に重大な障害が発生することが容易に考えられる。

本稿では、我が社が新しく発売した「三相モータ絶縁劣化監視モジュール」(以後：絶縁監視モジュール)について、その原理と応用について解説する。我が社の絶縁監視モジュールは、タナシン電機(株)の漏洩電流・絶縁劣化監視技術である「Modes-IO®(モデスイオ)」を搭載した最新の絶縁劣化監視システムで、以下のような課題を解決するための計測システムを実現することが可能である。

① 設備の点検工数を削減したい→常時監視により点検作業の省力化が可能。

② 設備の絶縁劣化状態を見える化したい→設備を止めずに常時監視が可能。

③ 設備故障時のロスをなくしたい→データを蓄積し故障予兆監視に利用可能。

ここではまず、三相誘導電動機の絶縁劣化管理の重要性について説明し、絶縁監視モジュールの原理について解説を行う。最後にシステム構築をした場合の運用について展望を述べる。

モータの故障要因

三相誘導電動機の主要部品は、固定子、固定子コイル、回転子、軸受などの基本的構造と電力を供給するための端子箱、冷却を行う冷却ファンなどの補助機構から構成される(**図1**)。

一般的に電動機の故障は、各部位の構成要素の長年の歳月とともに劣化が進行した結果として故障に至る。経年劣化の要因は、電気的、機械的、熱的を含め様々な環境的要因により進行するが、三相誘導電動機における故障原因の調査結果によると、軸受関連の故障(41%)、固定子巻線に関する故障(37%)、回転子関連の故障(10%)との報告がある。

固定子巻線に関する故障のうち約80%は、絶縁に関する故障であることが報告されているので、絶縁による故障要因は全体の約3割と考えることができる。

低圧電動機の絶縁劣化の進行は、一般的に外部環境による汚損・吸湿と電気的ストレスの複合作用が主な要因であり、これに熱や機械的なストレスが付加され絶縁劣化が進行すると考えられる。

電動機において絶縁劣化が進行して固定子コイルの絶縁貫通抵抗が低下すると、地絡、相間短絡、レアショートなどの事象に至る(**表1**)。絶縁劣化の状態となった場合には、設備の故障や、最悪の場合には人命に関わる事故などの危険があるので、絶縁劣化診断は非常に重要な技術となる。

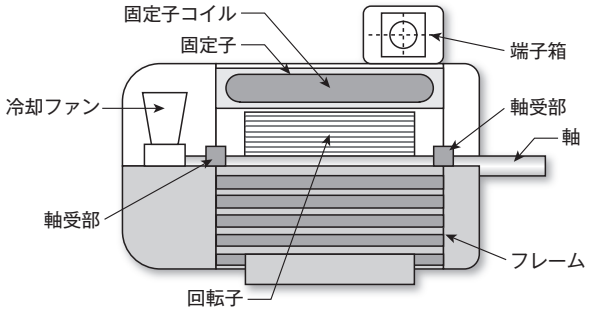

図1 代表的な三相誘導電動機の基本構造

表1 絶縁劣化に伴う事象の説明

地絡	電気回路と大地との間で絶縁が極端に低下して、その間がアークまたは導体によってつながっている状態。 地絡が生じた場合、感電災害や設備の損傷などが発生する可能性が高くなる。
相間短絡	2つの相、または3つの相の線間が負荷を通さずに接触してしまった状態。 非常に小さな抵抗の回路と同等な状態になるので、大きな電流が流れることになり、モータの損傷や火災などが発生する可能性が高くなる。
レアショート	本来絶縁されているはずのコイルの導線部分が接触してしまった状態。 レアショートが発生した場合、コイルの巻線数などが変化するので本来の性能が低下する。また、短絡したコイルのターンにも磁束が作用するので、この起電力に対しては短絡状態となり異常加熱などの現象が起きることがある。

絶縁診断技術の課題

低圧電動機の絶縁状態の診断を行うためには、構成要素の化学的変化、絶縁層の剥離、亀裂や摩耗による損傷などにより、絶縁性能の低下が発生した状態を的確に検知する必要がある。絶縁劣化の状態は、外観検査や通常の運転状態から見つけ出すことは簡単ではなく、絶縁抵抗計などを使用した検査も手軽とは言えない。

絶縁劣化診断における課題として次の点が挙げられる。

① 数か月に一度の定期点検での絶縁抵抗計の計測値は、積もった塵埃の量や周囲の湿度により測定結果がばらつくため、絶縁劣化の経年変化を判断するのは難しい。

② 老朽化が進む設備が増加する一方、新たな設備での利用なども加わり、管理が必要な電動機が増えており、絶縁抵抗測定などの一般的な方法では、正確なデータ管理や人的な負担の問題もあり、絶縁劣化の兆候検知は非常に困難と思われる。

③ 絶縁劣化の傾向管理を行うためには、設備の動作中の時間や周囲環境の変化を含めた継続的な測定値が必要だが、一般的な計測方法では実現できない。

絶縁劣化の兆候管理を実現するためには、モータ動作中においても絶縁抵抗が測定できるような仕組みが必要である。また、近年採用が増えているインバータを利用した設備での、絶縁劣化の管理についても簡単に実現できることが望ましい。

漏洩電流の成分

一般的に漏電遮断器や漏電リレーが用いられて、これらの機器で計測する漏洩電流は I_0 と呼ばれる。この I_0 は、I_{0r}（抵抗成分漏洩電流）と I_{0c}（容量成分漏洩電流）が合成されたものである（**図2**）。

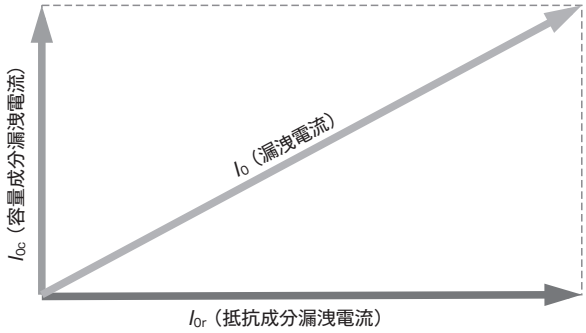

図2 漏洩電流の成分

I_0（漏洩電流）＝

I_{0r}（抵抗成分漏洩電流）＋ I_{0c}（容量成分漏洩電流）

- I_0（漏洩電流）：I_{0r} と I_{0c} をベクトル合算した漏洩電流値

→　一般的な漏電遮断器や監視装置は I_0 の値で管理される。

- I_{0r}（抵抗成分漏洩電流）：絶縁劣化が進行した際に現れる抵抗成分に流れる漏洩電流

→　この電流成分が大きな場合、電動機の発熱や感電などの危険がある。

- I_{0c}（容量成分漏洩電流）：電源配線から大地間に発生する対地間容量（コンデンサ容量）に対して流れる漏洩電流で、新しい設備でも容量成分がある。

→　発熱や感電の危険性は少ない。

最近は容量成分の多い機器（コンピュータ、無停電電源装置）などが増えており、このような設備が多い場合、電路に絶縁不良がなくとも、I_0 電流（成分の多くが I_{0c}）が警報設定値を超えることがある。

絶縁監視モジュール

我が社の絶縁監視モジュールでは、低圧電動機の動作中の絶縁抵抗の測定を実現しており、これまで設備を停止させなければ測定できなかった電源やモータの絶縁抵抗を、電動機の動作中に測定することが可能である。

絶縁監視モジュールは、**図3**のように測定モジュールと ZCT（零相変流器）により構成されており、非常に簡単に設置が可能である。

絶縁監視モジュールは、次のような特徴がある。

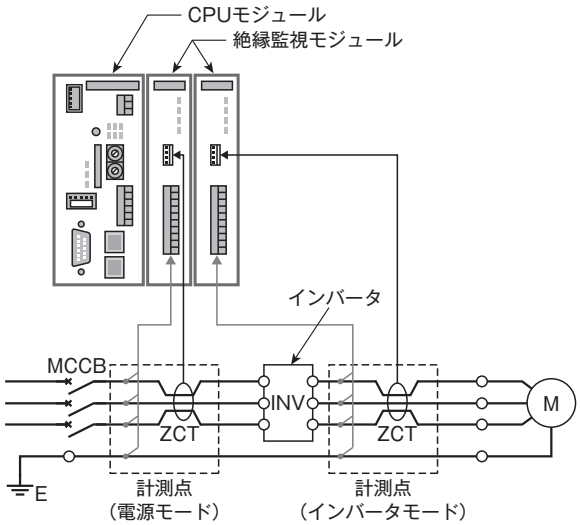

図3 絶縁監視モジュールの配線

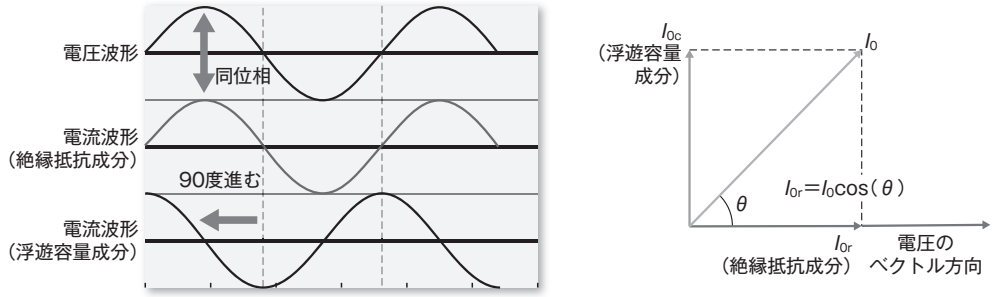

図4 三相誘導電動機の漏洩電流

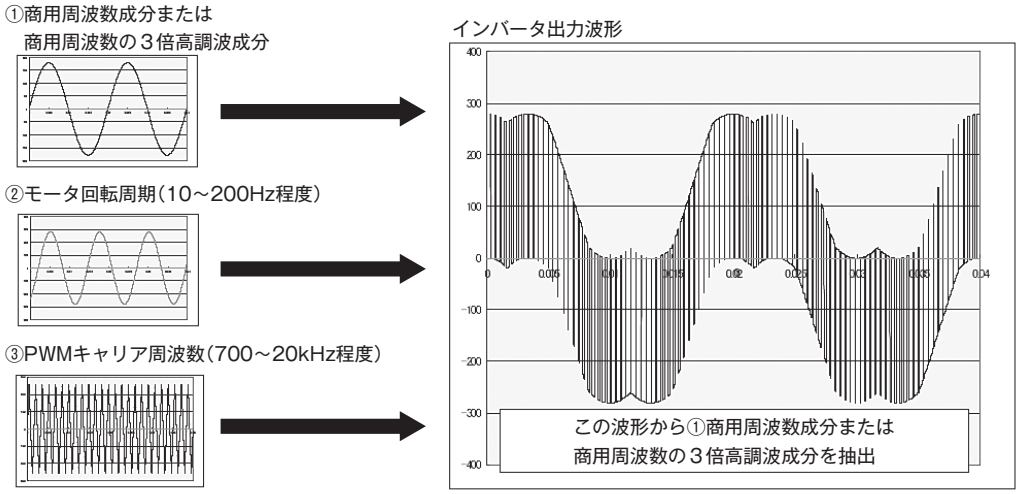

図5 インバータ出力⇔対地間電圧に含まれる周波数成分

① 電動機の動作中の絶縁抵抗を測定することが可能。
② 通常の三相電源だけでなくインバータ出力側の絶縁抵抗が測定可能。
③ ハードおよびソフト的なノイズ対策により高精度な測定を実現。
④ 漏洩電流の中から絶縁抵抗成分（I_{0r}）を分離して測定可能。

非常に優れた点として、内部的な演算により絶縁抵抗成分（I_{0r}）を分離して測定が可能なため、容量成分漏洩電流（I_{0c}）が多い設備の測定において、機器の発熱や感電の危険が高いとされる絶縁抵抗成分（I_{0r}）の値を直接監視できるため、設備故障予知や安全管理の観点から有用なツールとなる。

三相誘導電動機の漏洩電流

三相誘導電動機は、電圧波形に対して、絶縁抵抗成分に流れる電流の位相は一致するが、容量成分に流れる電流は90度位相が進む。実際の漏洩電流波形は絶縁抵抗成分と浮遊容量成分の合算となり、容量成分とは90度位相があるので、**図4**のようなベクトル合算値となる。

ZCTで測定される電流値はこの合算値（I_0）となるため、I_0と電圧波形の位相差 θ より、以下数式で抵抗成分漏洩電流（I_{0r}）を算出できる。

I_{0r}（抵抗成分漏洩電流）＝ I_0（漏洩電流）$\cos(\theta)$

インバータ出力側漏洩電流の測定

インバータ出力側（２次側）に出力される対地間電圧は、以下３点の周波数成分が合成された波形として出力される（**図5**）。

① 商用周波数成分または商用周波数の３倍高調波成分
② モータ回転周期（10 ～ 200Hz 程度）
③ PWM キャリア周波数（700 ～ 20kHz 程度）

漏洩電流は、これらの周波数成分に対して発生するが、絶縁監視モジュールの測定方法は商用周波数成分を正確に抽出し I_{0r}（抵抗成分漏洩電流）を算出可能である。

絶縁抵抗計での計測との違い

絶縁監視モジュールによる計測結果は、**図6**のグラフ

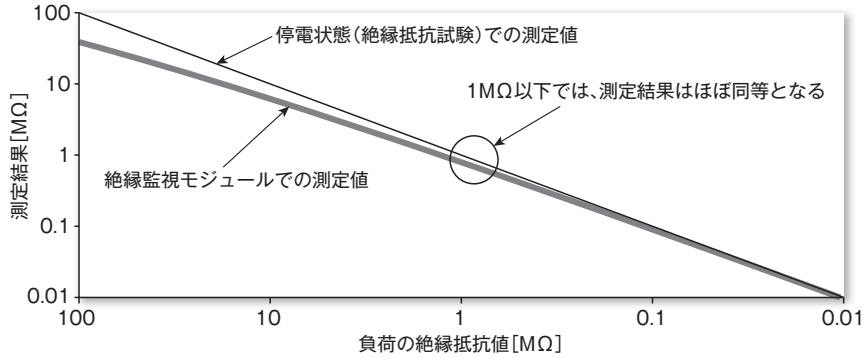

図6 絶縁抵抗計との計測値の比較

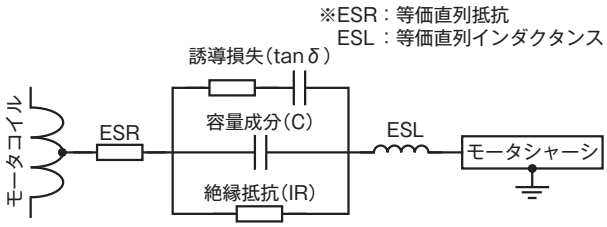

図7 低圧誘導電動機の絶縁抵抗

のように、絶縁抵抗計の計測結果よりも計測結果の絶縁抵抗値が低い傾向となる。

これは主に「測定方式」および「測定成分」が異なるための結果であるが、検証の結果では絶縁劣化経過とともに絶縁抵抗値が小さくなると、双方の値はほぼ同等となる結果が得られた。

また、絶縁監視モジュールの測定方式では、絶縁抵抗測定で測定されるIR（絶縁抵抗）成分に加えて、浮遊容量に含まれる誘電損失（tanδ）成分も測定するため、絶縁抵抗計のみの測定では確認が不可能な誘電損失を含めた正確な絶縁劣化管理が可能である。

絶縁抵抗の常時監視によるメリット

一般的に保守作業で実施されている低圧誘導電動機の点検は、6か月に一度程度の絶縁抵抗計による測定および数年間隔の分解点検が行われる（**図7**）。これらの点検では、計画的な保全作業の範囲での設備保守となっており、突然の設備停止などを事前に予測することは困難である。

また、絶縁抵抗計による測定は電路の停止が必要であり、さらにインバータが利用されている設備では、低圧誘導電動機の配線を切り離す必要がある。計画的な設備停止の必要性や、配線の切り離し後の復旧に伴う作業ミスのリスクなど多くの課題が存在する。

絶縁監視モジュールによる低圧誘導電動機の常時監視システムを導入することにより、これらの課題を解決することが可能である。

【絶縁監視モジュールの利点】

① 電動機の動作中の計測が可能なため、電路を停止する作業が不要である。

② インバータの出力側の測定が可能なため、負荷状況の変化と合わせた測定が可能。

③ 誘電損失（tanδ）など交流電圧でしか発生しない絶縁劣化成分の測定が可能。

④ 常時データが収集可能なため、予兆監視に適している。

今後の展望

絶縁監視モジュールによる絶縁抵抗の測定では、動作中の電動機の絶縁抵抗を測定することが可能となり、絶縁劣化による突然の設備故障の兆候を監視することができる。

低圧誘導電動機の故障要因は、絶縁抵抗の劣化だけでなく軸受や回転子関連の機械的故障も大きな要因である。これらの要因を総合的に判断して故障の兆候検知を行うことが、「止まらない工場」や「安心安全な社会」を実現するために必要である。

絶縁監視モジュールを装着するCPUモジュールには、温度計測モジュールやアナログ計測モジュールなど、他の動作環境要素を計測する機能を追加することが可能なので、電動機の周囲や表面温度、モータシャーシの振動や変位などを計測し、統計的な解析を行うことで、より多くの故障要因に関連する設備停止の兆候を検知することが可能となる。

今後、急速に普及すると思われる人口知能（AI）の技術を取り入れることにより、より利便性の高い、設備故障の兆候検知システムの研究を行う予定である。

参考文献

（1）岩永英樹：「電動機の零相電流分析による絶縁劣化兆候検出手法の研究」，早稲田大学審査学位論文，2013年1月
（2）電気学会技術報告：「誘導機の故障診断技術」，第1196号，2010年7月