

電気信号情報を活用した モータ設備の異常検知技術

金丸 誠* 林 和史***
井上 啓**
宮内俊彦***

Fault Detection Technique for Motor Equipment Using Electrical Signal Information

Makoto Kanemaru, Hiroshi Inoue, Toshihiko Miyauchi, Kazufumi Hayashi

要 旨

モータは、工場の生産設備や機械設備の動力を担うキーコンポーネントである。工場では、生産性の観点からモータの安定な連続運転が要求される。しかしながら、近年、メンテナンス費用削減や省力化が進められており、モータの安定な連続運転が見込めない状況に陥りつつある。そこで、メンテナンス要員の技能レベルに依存しないモータ設備の異常検知技術が強く望まれ始めている。

今回、運転中のモータの電気信号情報(電流と電圧)から異常検知に必要な特徴量を抽出し、5種類のモータ設備異常(①機械系異常、②回転子バー異常、③ベルト断線、④レヤショート、⑤トルク異常)を検知する技術を開発した。電流センサで取得したモータ電流の特徴量を抽出・解

析することで、①機械系異常、②回転子バー異常、③ベルト断線を検知する。そして、電流センサと電圧センサで取得したモータ電流・電圧の特徴量を抽出・解析することで、④レヤショート、⑤トルク異常を検知する。

この開発によって、モータ設備異常検知機能を業界で初めて(注1)モータコントロールセンタに搭載した。これによって、メンテナンス要員の技能レベルに依存せず、モータの突発的な故障停止を回避でき、モータの安定な連続運転を期待できる。

今後も、モータを始めとした電気設備の安心・安全を支える技術の開発を進めていく。

(注1) 2018年10月1日現在、当社調べ

異常部位	異常内容
機械系部品(軸受等)	機械系異常 (軸受異常, 偏心, ミスアライメント等)
回転子バー	回転子バー異常 (回転子バー折損)
ベルト接続部	ベルト断線
固定子巻線	レヤショート
負荷設備	トルク異常

モータ設備異常検知機能付きモータコントロールセンタのシステム構成

左の図は、モータ設備異常検知機能付きモータコントロールセンタのシステム構成を示す。モータコントロールセンタ内のセンサでモータの電流・電圧を計測し、異常検知に必要な特徴量を抽出・解析することで、モータ設備の異常を検知する。右の表は、モータ設備異常を検知する項目を示す。5種類のモータ設備異常(①機械系異常、②回転子バー異常、③ベルト断線、④レヤショート、⑤トルク異常)を検知する。

1. ま え が き

三菱電機は、持続可能な社会の実現のために、電気設備の安心・安全を支える技術の開発に取り組んでいる。電気設備の中でモータは、工場の生産設備や機械設備の動力を担うキーコンポーネントである。

工場では、生産性の観点からモータの安定な連続運転が要求される。しかしながら、全てのモータが良好な環境下で運転しているわけではない。高温、高負荷、腐食、摩耗等の高ストレス環境下で運転しているケースも多く、モータへの負担は大きい。モータへの負担が大きいと、突発的な故障停止を招くおそれがある。モータの突発的な故障停止は、生産ラインの停止や製品歩留まりの悪化に直結し、経営損失を引き起こす。このような突発的な故障停止を回避するために、工場ではメンテナンス要員を常駐させている。しかしながら、近年、経営効率化のため、メンテナンス費用削減や省力化が進められている。さらに、世代交代によるメンテナンス要員の点検技能低下や素人化の傾向も指摘されており、モータの安定な連続運転が、ますます見込めない状況に陥りつつある。そこで、メンテナンス要員の技能レベルに依存しないモータ設備の異常検知技術が強く望まれ始めている。

本稿では、運転中のモータの電気信号情報(電流と電圧)から異常検知に必要な特徴量を抽出し、5種類のモータ設備異常(①機械系異常、②回転子バー異常、③ベルト断線、④レシャオート、⑤トルク異常)を検知する技術について述べる。この技術は、モータコントロールセンタに搭載され⁽¹⁾、2018年10月から受注を開始している。

2. モータ設備の異常検知技術

2.1 機械系異常検知技術

2.1.1 機能

電流センサで取得したモータ電流を周波数解析し、機械系異常起因の特徴周波数を監視することによってモータ稼働中に機械系異常(軸受異常、偏心、ミスアライメント等)を検出する。本稿では、軸受異常検知について述べる⁽²⁾。

2.1.2 検知手法

機械系異常が発生すると、固定子と回転子間のエアギャップの乱れ、又は回転速度の変動によってモータ電流へ影響を与える。そのため、機械系異常のモータ電流を周波数解析すると電源周波数の両側に式(1)の側帯波(f_m :モータ回転成分)が発生する。

$$f_m = f_s \pm f_r \dots\dots\dots (1)$$

ここで、 f_s は電源周波数、 f_r はモータ回転周波数である。機械系異常検知手法を図1に示す。電流センサで取得したモータ電流を周波数解析する。そして、電源周波数 f_s (例えば60Hz)を中心に、左右均等に発生する側帯波(モータ

回転成分Aとモータ回転成分B)を抽出する。側帯波はモータ回転周波数に依存し、モータの定格情報から発生周波数帯を理論的に特定できる。その後、抽出した側帯波の信号強度の傾向監視を行う。

2.1.3 試験結果

軸受の加速劣化試験を実施した。軸受内に異物(アルミナ約20mg)を注入し、モータを運転させた。そして、側帯波(モータ回転成分Aとモータ回転成分B)を監視した。その結果を図2に示す。正常状態の信号強度を基に縦軸の劣化度合いを決定した。図2から、時間とともに劣化度合いが増加することから、この手法を用いて軸受異常を検知可能である。なお、この技術は2018年電気学会産業応用部門論文賞を受賞した。

2.2 回転子バー異常検知技術

2.2.1 機能

電流センサで取得したモータ電流を周波数解析し、回転子バー異常起因の特徴周波数を監視することによってモータ稼働中に回転子バー異常(回転子バー折損)を検出する。

2.2.2 検知手法

回転子バー異常が発生すると、異常な回転子バーが固定子の磁極を通過するときに、空間磁束線に影響を及ぼすことによってモータ電流が影響を受ける。回転子バー異常のモータ電流を周波数解析すると電源周波数の両側に式(2)の側帯波(f_{bar} :回転子バー成分、 s :すべり)が発生する。

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

回転子バー異常検知手法を図3に示す。電流センサで取得したモータ電流を周波数解析する。そして、電源周波数 f_s を中心に、左右均等に発生する側帯波(回転子バー成分Aと回転子バー成分B)を抽出する。側帯波はモータのす

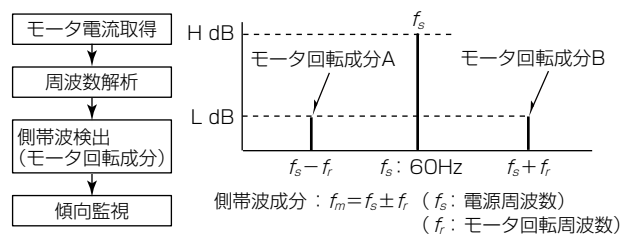


図1. 機械系異常検知手法

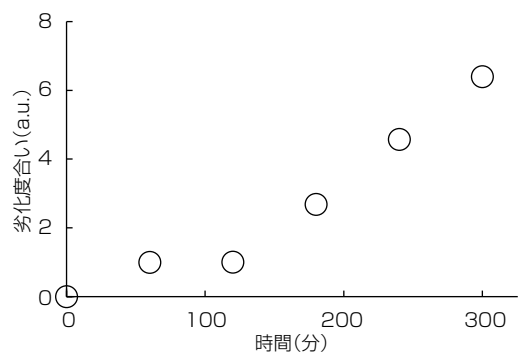


図2. 軸受の加速劣化試験結果

べりに依存する。その後、抽出した側帯波の信号強度の傾向監視を行う。

2.2.3 試験結果

正常時と回転子バー1本折損時の電流信号強度の結果を図4に示す。図から、回転子バー1本折損時の電流信号強度が、正常時に対して10.4~14.9dB増加した。正常時の電流信号強度との差が大きいため、この手法を用いて回転子バー異常を検知可能である。

2.3 ベルト断線検知技術

2.3.1 機能

電流センサで取得したモータ電流を周波数解析し、ベルト回転起因の特徴周波数を監視することによってモータ稼働中にベルト断線異常を検出する。

2.3.2 検知手法

ベルト断線が発生すると、ベルト張力に起因する軸振動の影響が消滅する。モータ軸振動の周波数は、単位時間当たりベルトが回転する周波数 f_{belt} に現れる。 f_{belt} は式(3)で表される。

$$f_{belt} = \frac{\pi D \cdot f_r}{L} \dots\dots\dots (3)$$

ここで、 D ：モータプーリ径、 f_r ：モータ回転周波数、 L ：ベルト長さである。そのため、モータ電流を周波数解析すると電源周波数の両側に式(4)の側帯波(f_c ：ベルト成分)が発生する。

$$f_c = f_s \pm k f_{belt} (k=1, 2, 3, \dots) \dots\dots\dots (4)$$

ベルト断線検知手法を図5に示す。電流センサで取得したモータ電流を周波数解析する。そして、電源周波数 f_s を中心に、左右均等に発生する側帯波(ベルト成分Aとベルト成分B)を抽出する。その後、抽出した側帯波の信号強度の傾向監視を行う。

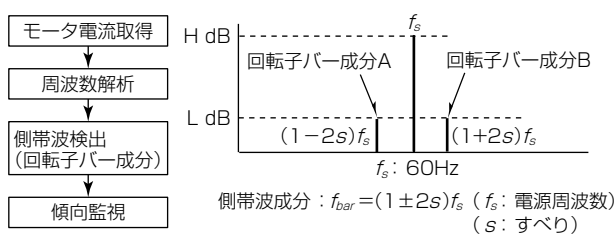


図3. 回転子バー異常検知手法

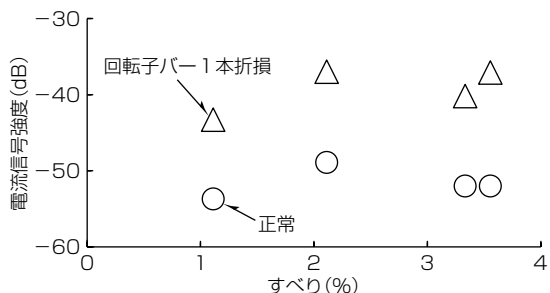


図4. 正常時と回転子バー1本折損時の電流信号強度

2.3.3 試験結果

正常時とベルト断線時の電流信号強度の結果を図6に示す。ベルト断線の場合、ベルト起因の側帯波が消滅する。これは、ベルト断線によってベルト張力の影響が消え、ベルト起因の電流変動が消滅したためである。図から、ベルト断線時の電流信号強度が、正常時に対して14.9~35.5dB減少した。正常時の電流信号強度との差が大きいため、この手法を用いてベルト断線を検知可能である。

2.4 レヤショート検知技術

2.4.1 機能

電流センサと電圧センサで取得したモータ電流と電圧の不均衡成分を監視することによってモータ稼働中にレヤショート(巻線短絡)を検出する(3)。

2.4.2 検知手法

レヤショートが発生すると、モータ巻線のインピーダンスが不平衡となる。そのため、モータ電流と電圧の不均衡性を解析することで、レヤショートを検出できる。

レヤショート検知手法を図7に示す。モータ電流と電圧を取得後、式(5)と式(6)で対象座標変換し、逆相電流 I_{sn} と逆相電圧 V_{sn} を算出する。

$$I_{sn} = \frac{1}{3} (I_a + a^2 I_b + a I_c) \dots\dots\dots (5)$$

$$V_{sn} = \frac{1}{3} (V_a + a^2 V_b + a V_c) \dots\dots\dots (6)$$

電源不平衡時も逆相成分が変化することから、逆相電流 I_{sn} と逆相電圧 V_{sn} の両方を考慮して式(7)のレヤショート評価値 ΔI_{sn} を定義した。

$$\Delta I_{sn} = |I_{sn} - Y_n V_{sn}| \dots\dots\dots (7)$$

ここで、 Y_n は初期逆相アドミタンスで、測定開始時に算出できる。そして、レヤショート評価値 ΔI_{sn} の傾向監視を行い、信号強度が増加したときにレヤショートと判定する。

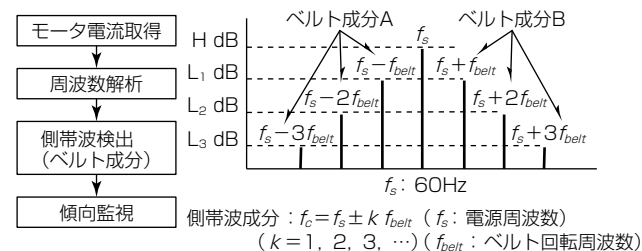


図5. ベルト断線検知手法

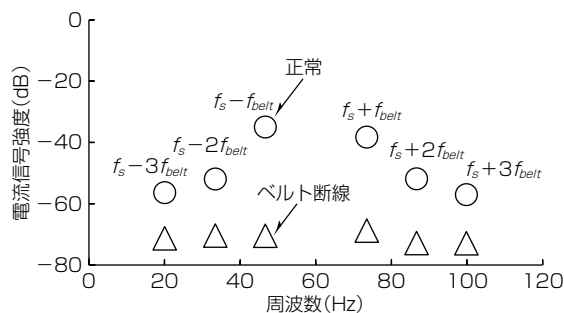
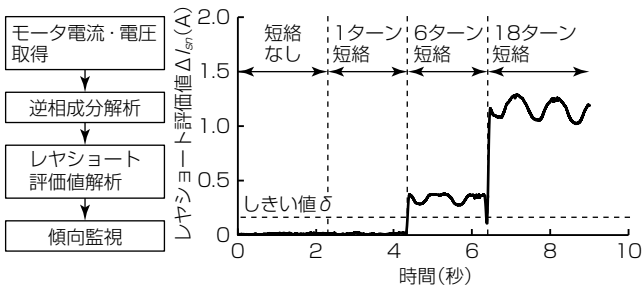


図6. 正常時とベルト断線時の電流信号強度



レヤショート評価値 $\Delta I_{sn} \geq \delta$: レヤショート
 $\Delta I_{sn} = |I_{sn} - Y_n V_{sn}|$ $\Delta I_{sn} < \delta$: 正常 (δ : しきい値)

図7. レヤショート検知手法と試験結果

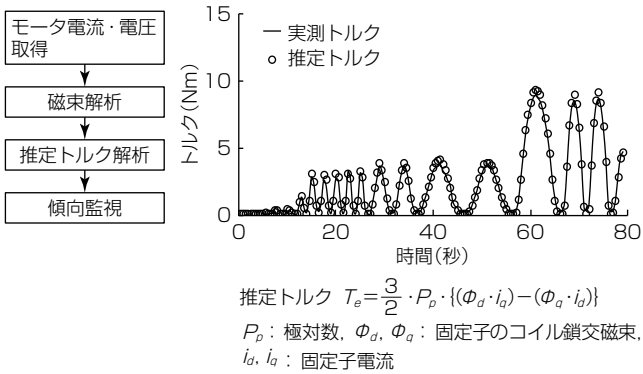


図8. トルク異常検知手法と試験結果

2.4.3 試験結果

レヤショート発生時のレヤショート評価値の結果を図7に示す。巻線短絡数が増加すると、レヤショート評価値も増加した。1ターン短絡の微小変化を検知することは困難であるが、6ターン短絡を十分検知可能であることから、この手法を用いてレヤショートを検知可能である。

2.5 トルク異常検知技術

2.5.1 機能

電流センサと電圧センサで取得したモータ電流と電圧を解析することによって、トルク推定を行い、トルク異常を検出する。

2.5.2 検知手法

トルク T_e の理論式は、モータ電流と鎖交磁束を用いて式(8)のように表される。 P_p は極対数、 Φ_d 、 Φ_q は固定子のコイル鎖交磁束、 i_d 、 i_q は固定子電流である。

$$T_e = \frac{3}{2} \cdot P_p \cdot \{(\Phi_d \cdot i_d) - (\Phi_q \cdot i_q)\} \dots\dots\dots (8)$$

トルク異常検知手法を図8に示す。モータ電流・電圧取得後に磁束解析し、トルク推定を行う。そして、推定したトルクを監視する。

2.5.3 試験結果

実測トルクと推定トルクの比較結果を図8に示す。実測トルクと推定トルクは、時間的な変動に対してよく一致していることから、この手法を用いてトルク異常を検知可能である。

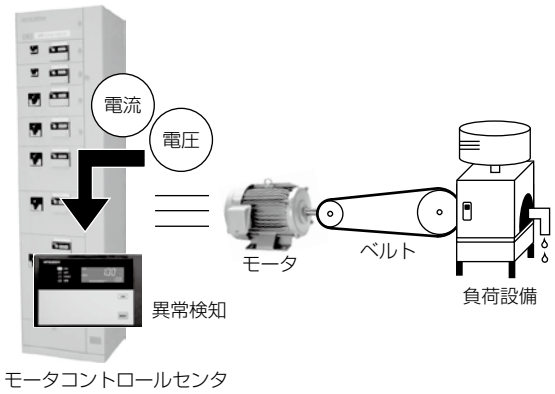


図9. モータ設備異常検知機能付きモータコントロールセンタのシステム構成

表1. モータ設備異常を検知する項目

異常部位	異常内容
機械系部品(軸受等)	機械系異常 (軸受異常、偏心、ミスアライメント等)
回転子バー	回転子バー異常(回転子バー折損)
ベルト接続部	ベルト断線
固定子巻線	レヤショート
負荷設備	トルク異常

3. モータコントロールセンタへの適用

モータの運転・停止、保護、監視を集中管理するモータコントロールセンタに、業界で初めて5種類のモータ設備異常を検知する機能を搭載した(図9)。運転中のモータ電流・電圧から劣化診断に必要な特徴量を抽出・解析することで、5種類の異常部位・内容を検知できる(表1)。

4. むすび

運転中のモータの電気信号情報(電流と電圧)から異常検知に必要な特徴量を抽出し、5種類のモータ設備異常(①機械系異常、②回転子バー異常、③ベルト断線、④レヤショート、⑤トルク異常)を検知する技術について述べた。この技術は、モータコントロールセンタに搭載され、2018年10月から受注を開始している。今後も、持続可能な社会の実現のために、電気設備の安心・安全を支える技術の開発を進めていく。

参考文献

- (1) 関 孝一郎, ほか: 海外市場向け低圧モータコントロールセンタ“D”, 三菱電機技報, 91, No.11, 614~618 (2017)
- (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, 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, 137, No.1, 17~23 (2017)