

平成28年度

コラム形水中ポンプの状態監視技術について

国立研究開発法人土木研究所寒地土木研究所寒地機械技術チーム ○小林 勇一
平地 一典
田所 登

河川管理施設である救急排水機場は、内水を排水し洪水被害を軽減することを目的に設置された重要な施設である。しかし、救急排水機場で使用されているコラム形水中ポンプは、コラムパイプ内に設置し排水作業を行うことから、稼働中に異常や変調を確認することは極めて困難である。限られた予算のなかで設備の信頼性を維持していくためには、状態を的確に把握したうえで、必要な修理や更新を行う必要がある。そこで、コラム形水中ポンプにおける状態監視技術の提案に向けた基礎検討として、回転機械の状態監視に適用されている各種計測、診断技術について調査し、コラム形水中ポンプへの適用性について評価した。

キーワード：健全度、長寿命化、維持・管理

1. はじめに

河川管理施設である排水機場や救急排水機場は、内水を排水し洪水被害を軽減することを目的に設置された重要な施設であり、非常時には確実に稼働しなければならない。

救急排水機場ではコラム形着脱式縦軸斜流水中モーターポンプ（以下、コラム形水中ポンプという）が使用されているが、コラムパイプ内に設置し排水作業を行うことから、現場の運転員や点検従事者がポンプの運転中に目視や触診などにより異常や変調を確認することは極めて困難である。

また、設備の老朽化が進んでおり、限られた予算のなかで信頼性を維持していくためには、状態を的確に把握したうえで、必要な修理や更新を行う必要がある。

そこで、コラム形水中ポンプにおける状態監視技術の提案に向けた基礎検討として、回転機械の状態監視に適用されている各種計測、診断技術について調査し、コラム形水中ポンプへの適用性について評価した。

2. コラム形水中ポンプの概要

写真-1に救急排水機場の外観を、写真-2にコラム形水中ポンプを示す。

救急排水機場は、地域ごとの内水の状況に応じた機動的かつ効率的な排水作業を行うことを目的に、救急内水対策事業で設置された排水量 $10\text{m}^3/\text{s}$ 以下の小規模排水機

場である¹⁾²⁾。

救急排水機場のポンプユニットは、常設されたコラムパイプ、および可搬式のコラム形水中ポンプで構成されており、緊急時のポンプの円滑な運搬、設置のため、「救急排水ポンプ設備技術指針¹⁾」により仕様・規格が標準化されている。



写真-1 救急排水機場外観



写真-2 コラム形水中ポンプ

図-1にコラム形水中ポンプの設置概略図を示す。

コラム形水中ポンプはクレーン等によりコラムパイプ上部からパイプ内に挿入し設置する。

ポンプは、稼働中は常にコラムパイプ内にあり、目視や触診はできない。またポンプを引き上げた状態での空回転もできないため、ポンプの稼働状態を確認することは極めて難しい。

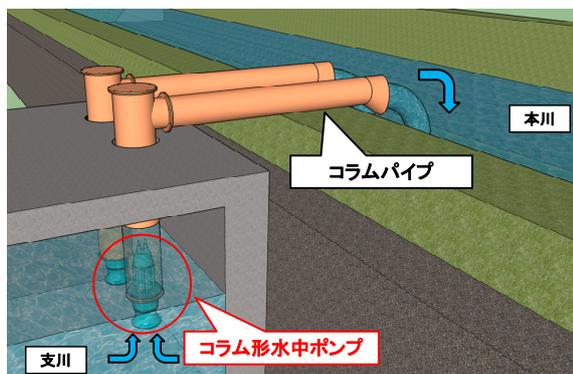


図-1 コラム形水中ポンプ設置概略図

表-1 計測、診断技術の適用性評価

診断項目	計測、診断技術	計測の容易さ	計測結果の有効性	総合評価
振動	変位計測	×	—	×
	加速度計測	△	○	△
潤滑油	フェログラフィー法	△	○	△
	SOAP法	△	○	△
	潤滑油分析	○	△	△
AE	AE計測	△	△	△
温度	温度法	△	×	×
	温度分布	△	×	×
音	音響法	△	×	×
電気	絶縁診断	△	△	△
	電流・電圧測定	○	×	×
	電流情報診断	○	○	○
その他	コロナ放電	×	○	×
	非破壊検査	×	○	×
	管理運転実施	×	○	×
	内視鏡診断	×	○	×
	主軸回転トルク計測	×	○	×

3. 状態監視技術の調査と適用性の検討

コラム形水中ポンプへの適用性を検討するため、水中ポンプや電動モーターなど回転機械の状態監視に適用されている各種計測、診断技術について、ISOの「機械の状態監視と診断」関連規格やポンプメーカーからの聞き取りなどをもとに、調査を実施した。

調査した技術について、コラム形水中ポンプへの適用性を評価した結果を表-1に示す。

評価項目は、「計測の容易さ」と「計測結果の有効性」の2項目とし、評価はそれぞれ3段階とした。

「計測の容易さ」は、計測機器の設置や潤滑油の採取などの容易さとし、「計測結果の有効性」は、計測値の信頼性の高さ、故障の有無の判断のし易さ、および故障要因の推察の容易さとした。

評価の結果、電流情報診断が最も適用性が高い技術となった。

電流情報診断は、三相誘導電動機に発生する逆起電力を計測し解析することで、機械の異常を検出する技術である。コラム形水中ポンプの電動機形式は水中乾式かご形三相誘導電動機であるため、電流情報診断の適用が可能である。

写真-3に電流情報診断の電流計測用クランプを、図-2に診断画面を示す。

計測方法は、機側電流盤からコラム形水中ポンプにつながる三相電源の配線にクランプを取り付けるのみであり、非常に容易である。

また、水流等の外的要素が計測機器に影響を与えることも無いため、コラム形水中ポンプの状態監視への適用が期待できる。



写真-3 電流計測用クランプ

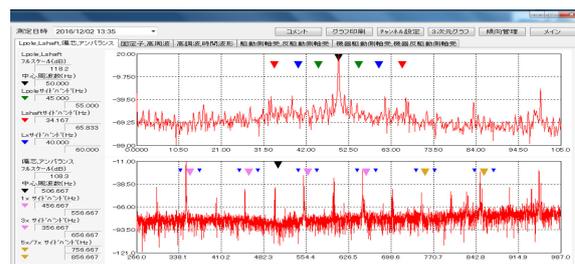


図-2 診断画面

4. 電流情報診断

電流情報診断は、誘導電動機電流兆候解析（Motor Current Signature Analysis：以下、MCSAという）に基づいている。

MCSAは、固定子と回転子間のエアギャップの変化や回転子バーの抵抗値変化、回転の変動、トルクの変動などが空間磁束線に影響を与え、逆起電力を通して固定子に流れる電流に反映しているという理論に基づいている³⁾。

(1)三相誘導電動機の回転原理

図-3に三相誘導電動機の模式図を、図-4にフレミングの法則を示す。

三相誘導電動機の回転機構は、固定子と回転子からなる。固定子に電流を流すと、磁界が発生するとともに、交流電源の位相変化に合わせて磁界が回転するように変化する。この回転磁界により、回転子は磁界から見て相対的に反対方向へ移動したことになり、フレミングの右手の法則により、回転子バーに電流が誘起される。磁界の中にある回転子バーに電流が流れると、フレミングの左手の法則により電磁力が生じるため、その電磁力により回転子は回転する。

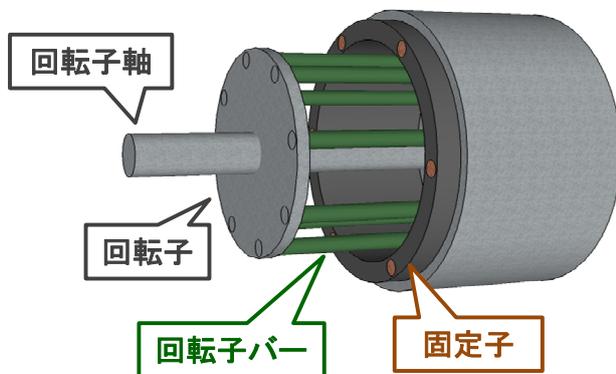


図-3 三相誘導電動機（かご形）模式図

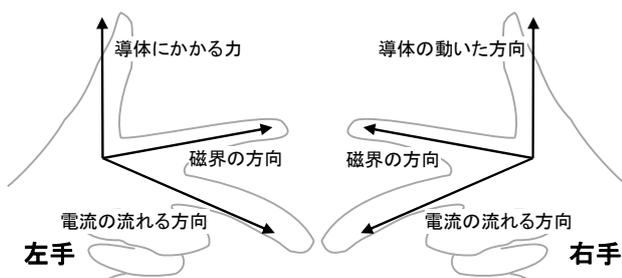


図-4 フレミングの法則

(2)回転子バーの損傷の解析

三相誘導電動機の回転原理より、回転子は磁界に対し相対的に移動することにより電流が発生し回転するため、磁界よりやや遅い周波数で磁界と同じ方向に回転する。

この回転磁界と回転子の周波数の差をすべり周波数と呼び、すべり周波数から回転子バーの損傷を解析することができる。

例として、電源周波数50Hz、極数6、実回転数980rpmのポンプについて、回転子バーの損傷解析を行う。

回転磁界の回転数（以下、同期回転数という）は、以下の式で求められる。

$$\text{同期回転数 } N_x = 120 \times \frac{f_L}{p} = 120 \times \frac{50}{6} = 1,000 \text{rpm}$$

f_L ：電源周波数

p ：極数

以上より、すべり周波数を求めると、

$$\text{すべり周波数 } f_s = \frac{N_x - N}{60} = \frac{1,000 - 980}{60} = 0.33 \text{Hz}$$

N ：実回転数

となる。

回転子から見ると、相対的に磁界は0.33Hzで回転していることになり、磁極が回転子バーを通過する際に、フレミングの右手の法則により、今度は固定子側に電流が誘起される。

仮に、回転子バーの1本が損傷などした場合、その回転子バーには電流が誘起されにくくなり、結果として固定子への電流誘起に影響を及ぼすことになる。その周波数は、回転子が磁極を通過する周波数となり、

$$0.33 \text{Hz} \times 6(\text{極数}) = 1.98 \text{Hz}$$

となる。

この場合の電流波形を周波数解析すると、図-5に示すとおり、電源周波数の両端±1.98Hzに側帯波が現れる。

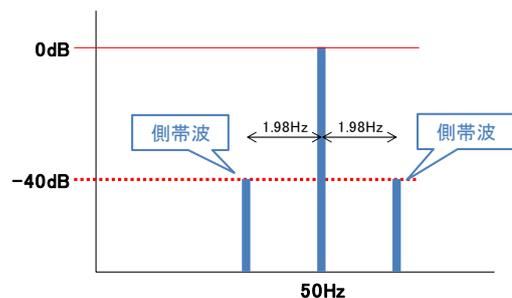


図-5 周波数解析例（回転子バーの損傷）

(3) 回転子軸の異常負荷の解析

電動機の回転子軸とポンプや減速機などを接続する接続軸にミスアライメントやアンバランスなどが発生した場合、回転子軸には異常負荷がかかる。

異常負荷により回転子が偏芯すると、空間磁束線に影響を与え、電流誘起に影響を及ぼす。

回転子の偏芯については、回転子バーの本数と回転子の回転周波数（以下、実回転周波数という）の積を求めて解析する方法がある³⁾。しかし、回転子バーの本数は電動機メーカーなどからは一般的に公表されておらず、多くの場合は電動機を分解して直接確認する必要がある。

回転子バーの本数が不明な場合の簡易的な解析方法として、実回転周波数による方法がある⁴⁾。

前述のポンプを例にとると、実回転周波数は、

$$\text{実回転周波数 } f = \frac{N}{60} = \frac{980}{60} = 16.3\text{Hz}$$

となる。

この場合の電流波形を周波数解析すると、図-6に示すとおり、電源周波数の両端±16.3Hzに側帯波が現れ、側帯波が大きくなるほど回転子軸への異常負荷の可能性が高まる。

回転子軸への異常負荷と側帯波の関係を解析することで、モーター本体の回転子軸のミスアライメントやアンバランス、軸受の損傷などのほか、接続したポンプや減速機などのカップリング心ずれや軸接触、軸曲がりなどの異常が検出できる可能性がある。

(4) 電流情報診断による解析事例

ダムゲートの開閉装置に使用されている三相誘導電動機2基について、電流を計測し周波数解析を実施した。

図-7に、周波数解析の結果を示す。

今回計測した2基の電動機は同じ規格で同時に設置されたものであり、それぞれを電動機A、電動機Bとした。

ここでは例として、実回転周波数の側帯波について解析する。

電動機の実回転数は2基とも990rpmであり、実回転周波数は16.5Hzとなる。周波数解析結果を確認すると、電源周波数50Hzの両端±16.5Hzに側帯波が現れている。

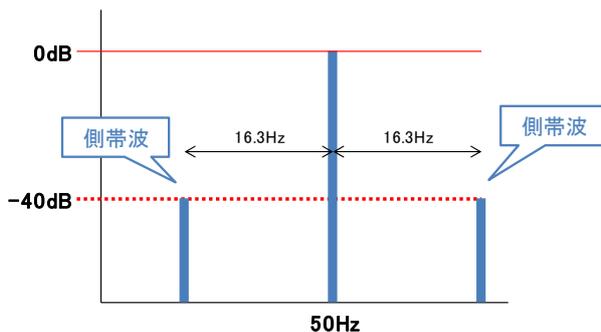


図-6 周波数解析例（回転子軸の異常負荷）

側帯波の大きさについては、電源周波数成分と実回転周波数側帯波電流成分の比率（以下、 L_{shaft} という）で確認する⁴⁾。電源周波数以外の周波数成分は非常に小さいため、大きさにはデシベルを用いており、 L_{shaft} は以下のとおりとなる。

$$L_{shaft} = 20 \log \frac{I_{line}}{I_{shaft}} = 20 \log I_{line} - 20 \log I_{shaft}$$

I_{line} : 電流周波数成分

I_{shaft} : 実回転周波数側帯波電流成分

つまり、 L_{shaft} は電源周波数成分と実回転周波数側帯波電流成分のデシベルの差となる。

L_{shaft} は、小さい方が電源周波数成分に近く、大きな側帯波であることを意味する。

ここで、図-7から L_{shaft} を確認する。側帯波は電源周波数の両端に出ているため、 L_{shaft} が小さい方を確認する。

L_{shaft} は、電動機Aが53.82dB、電動機Bが51.51dBとなっており、電動機Aに比べ電動機Bの方が側帯波が大きい。

その理由として、電動機Aは接続されている減速機を1年前に修理した実績があり、修理によりアンバランス等の不具合が解消され、回転子軸への負荷が軽減した可能性がある。

側帯波の大きさの変化を監視することで、故障を事前に予測できる可能性がある。

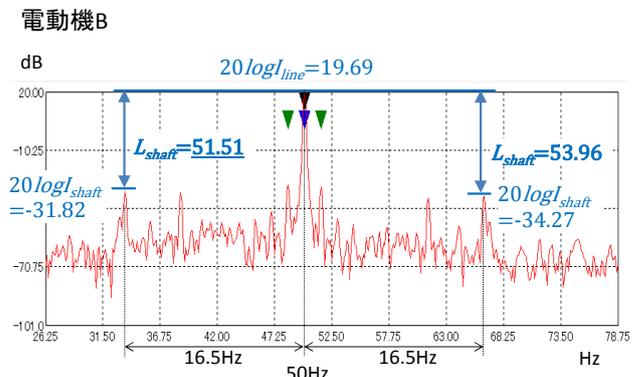
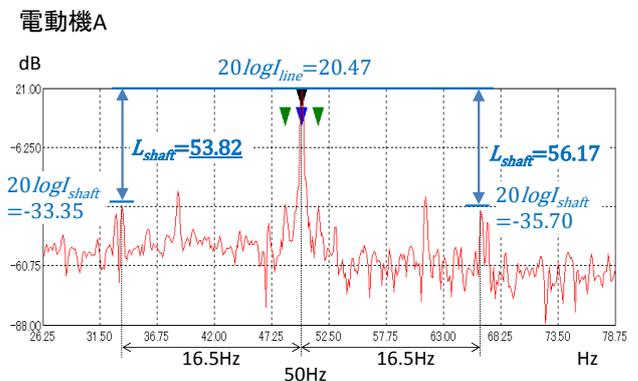


図-7 周波数解析結果

5. まとめ

コラム形水中ポンプにおける状態監視技術の提案に向けた基礎検討として、回転機械の状態監視に適用されている各種計測、診断技術について調査し、コラム形水中ポンプへの適用性について評価した。

評価の結果、電流情報診断が最も適用性が高い技術となった。

今後は、実際に救急排水機場でコラム形水中ポンプの電流情報診断を実施し、解析結果と損傷状態を比較することで、その適用範囲、診断精度などの検証を行う。

謝辞：電流情報診断に関してご協力いただいた株式会社高田工業所 劉信芳氏、山本英明氏に感謝する。

参考文献

- 1) 一般社団法人河川ポンプ施設技術協会：救急排水ポンプ設備技術指針・解説
- 2) 一般社団法人河川ポンプ施設技術協会：ポンプ施設の建設と管理
- 3) 豊田利夫：電機設備診断の進め方
- 4) 劉信芳：誘導電動機の電流信号による回転機械系の監視診断