

電流情報量診断の基礎理論と診断技術

Basic theory and diagnosis technique of T-MCMA[®]

劉 信芳 (技術本部), 馮 芳 (技術本部診断サービス技術部)

Xinfang LIU/Technology & Engineering DIV.

Fang FENG/Plant Diagnosis Service DEPT, Technology & Engineering DIV.

本稿では、当社が開発し、商品化した電流情報量診断システムT-MCMA[®](TAKADA Motor Current Multiplex Analysis) (以下、T-MCMA[®])の基礎理論とその診断技術を論述する。まず、誘導電動機の電流兆候解析MCSA (Motor Current Signature Analysis) (以下、MCSA) とその基本量を紹介する。次に電流情報量診断の基礎理論を説明し、診断用パラメータの定義を解説する。最後に電流情報量診断技術を用いた電動機回転機械系の簡易診断、劣化傾向管理、精密診断および診断システムを紹介する。

This paper discusses the basic theory and diagnostic technique of the TAKADA Motor Current Multiplex Analysis system (T-MCMA[®]) developed and commercialized by our company. First, the motor current signature analysis (MCSA) of an induction motor and its basic quantity are introduced. Next, the basic theory of TAKADA Motor Current Multiplex Analysis is explained, and the definition of diagnostic parameters is explained. Finally, we introduce a condition surveillance, a deterioration trend control, a precision diagnosis, and a diagnosis system for motor rotating machinery systems using TAKADA Motor Current Multiplex Analysis.

1. はじめに

三相または単相誘導電動機駆動回転機械系の監視・診断技術には振動診断技術、潤滑油分析診断技術と音響診断技術などが挙げられる。しかし、これらの診断技術は回転機械系の機械的な異常しか検出できず、電源・電動機の電氣的な異常の検出には無力である。また、液中ポンプ、高温・高湿環境下の回転機械、放射能エリア・防爆エリア用回転機械、毒・劇物エリア用回転機械では、信号計測・潤滑油のサンプリングが難しくなることが課題である。さらに、産業界からDXへの取組み、IoT・クラウドを用いた遠隔監視診断システムへの要望が高まっている。

当社は、産業界のニーズに応えるべく、MCSAを発展・進化させ、汎用性の高い回転機械系状態監視診断技術および当技術に基づいた診断システムT-MCMA[®]を開発し、商品化した。T-MCMA[®]は、従来の診断技術と同様に回転機械の機械的な異常を検出できるだけでなく、電動機、インバータ、電源などの電氣的な異常も検出できる。また、電気室の配電盤にクランプ式電流センサを設置するだけで、回転機械系状態のオンラインとオフライン監視診断が可能になり、さらに、IoT・クラウドまで対応している。

2. MCSAとその基本量

2.1 MCSA

1970年ごろ、世界の原子力発電所の動力源である原子炉の中に設置している電動機を検査する技術が必要とされていた。そして、アメリカのテネシー州にあるオークリッジ国立研究所が電動機の検査方法の研究開発を始めた。また、ほぼ同時期に日本でも、当時の八幡製鉄所（現在の日本製鉄九州製鉄所八幡地区）が同様な研究開発を開始した。そして、アメリカのオークリッジ国立研究所で、電動機の様々な異常状態で電動機の固定子の電流が変調することが発見された。さらに、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固定子と回転子間で相互作用する空間磁束線に影響を与え、逆起電力を通じて固定子電流が変調することが徐々に解明された。これにより、固定子電流の変調を用いて電動機の状態を解析するMCSAが考案された。最初に実用化されたのが電動機の回転子バー破損を検出する方法である。そして現在では、MCSAは回転子の異常診断だけでなく、回転子の静的偏心、動的偏心、固定子鉄心の破損、巻き線の緩みや絶縁劣化、軸系のミスアライメント、ロータのアンバランス、軸受の損傷などの異常を検出できるまで発展した^{1), 2)}。

診断対象の誘導電動機の原理を紹介しておく。図1に三相誘導電動機における固定子巻き線とそこに流れる三相交流電流、そしてその結果として生じる磁界の模式図を示す。なお、実際の誘導電動機では固定子スロット（溝）が数十本あり、固定子巻き線が少しずつスロットをずらしながら埋め込まれているが、ここでは概念を理解するために簡略化している。いま、三つの固定子巻き線が図1(a)のように取り付けられている。電流 I_C が流れる面を図1(a)の右図に示しているが、固定子巻き線はこのように一つのコイルを形成している。そして、三つの固定子巻き線のコイルにはそれぞれ、図1(b)に示すように120度ずつ位相がずれた電流 I_A 、 I_B 、 I_C が流れる。

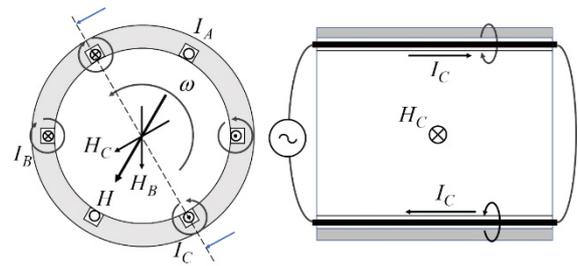
いま、図1(b)中の時刻 t_0 の時を考える。この時の電流値から、その電流による磁界 $H_A (= 0)$ 、 H_B 、 H_C およびその合成磁界 H を図1(a)中に示す。そして、もし三相交流電流が図1(b)のように時間変化する場合には、この構成磁界 H は図に示すように反時計方向に回転する。

図1で説明した固定子巻き線による回転磁界について、さらに模式的にして回転子も一緒に表したものを図2に示す。図2(a)には回転子を示し、図2(b)には固定子巻き線による三対の電磁石で表し、回転子を組み込んだ様子を示す。図1で説明したように三相交流電流が流れると、矢印で示す回転磁界が生じる。図2(a)の回転子全周には、実際に数十本の導体の回転子バーがあり、これらの回転子バーの両端は短絡環と接続する。電源投入直後の回転子は静止状態であり、固定子巻き線の三相交流電流により生じる回転磁界は静止した回転子バーを横切る。その結果、フレミングの右手法則により回転子バーに誘導的に電流が流れ、磁界が発生する。このとき、磁界が二つ形成されており、その一つは固定子巻き線の電流による回転磁界、もう一つは回転子の誘導電流による磁界である。これらの二つの磁界の相互作用により吸引力が発生し、回転子が回るようになる。このように三相誘導電動機では電気エネルギーが機械エネルギーに変換される。ただし、トルクがかかっているときの回転子の回転速度は、固定子巻き線の回転磁界の回転速度より少し遅い。この現象は誘導電動機のすべりという¹⁾。

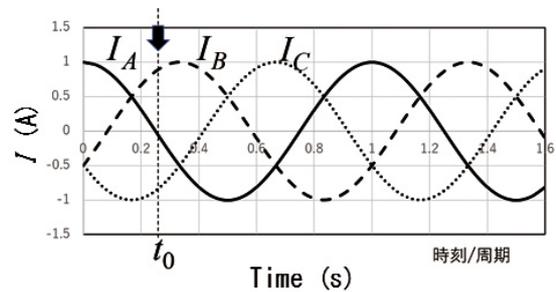
2.2 誘導電動機の基本量

診断理論の予備知識である誘導電動機の基本量とその計算例を紹介する。同期速度は固定子巻き線の電流による回転磁界の回転数 N_0 (rpm) であり、その周波

数 (Hz) 値は同期回転周波数 $f_0 = N_0 / 60$ (Hz) とともに次式となる。

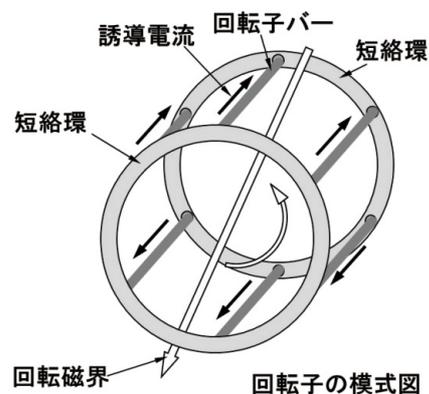


(a) 固定子巻き線と磁界の模式図

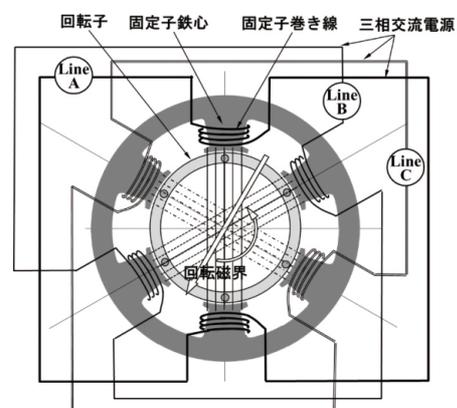


(b) 固定子巻き線の三相交流電流

図1 固定子巻き線の三相交流電流



(a) 回転子



(b) 回転子と固定子

図2 かご型三相誘導電動機の原理

$$N_0 = \frac{60f_{line}}{(p/2)}, f_0 = \frac{N_0}{60} = \frac{2f_{line}}{p} \quad (1)$$

ここで、 f_{line} は電源周波数 (Hz)、 p は電動機の極数である。電動機の最小極数はN極とS極の2極であり、式(1)分母は極数 p のペア数を示す。電動機回転子の回転速度 (以下、電動機回転数) を N_r (rpm)、その周波数 (Hz) 値は回転周波数 $f_r = N_r / 60$ (Hz) で表される。それらにより誘導電動機のすべり s は次式となる。

$$s = \frac{f_0 - f_r}{f_0} = \frac{N_0 - N}{N_0} \quad (2)$$

式(1)と(2)より誘導電動機の回転速度 N_r および回転周波数は次式となる。

$$N_r = N_0 (1-s), f_r = f_0 (1-s) \quad (3)$$

そして、電動機のすべり回転数 N_s (rpm) およびすべり周波数 $f_s = N_s / 60$ (Hz) は次式となる。

$$N_s = N_0 - N_r, f_s = f_0 - f_r \quad (4)$$

電源周波数 $f_{line} = 60$ Hz、4極電動機 ($p=4$)、電動機のすべり s は0.022とした場合の計算例を示す (電動機データは全計算例通用)。式(1)より同期回転周波数 f_0 (Hz) と同期回転速度 N_0 (rpm) は次式となる。

$$f_0 = \frac{f_{line}}{(p/2)} = \frac{60}{4/2} = 30 \text{ (Hz)}$$

$$N_0 = 60 f_0 = 60 \times 30 = 1800 \text{ (rpm)}$$

回転速度 N_r (rpm) と回転周波数 f_r (Hz) は式(3)より次式となる。

$$N_r = N_0 (1-s) = 1800 (1-0.022) \approx 1760 \text{ (rpm)}$$

$$f_r = f_0 (1-s) = 30 (1-0.022) \approx 29.33 \text{ (Hz)}$$

電動機のすべり回転数 N_s (rpm) とすべり周波数 f_s (Hz) は次式となる。

$$N_s = N_0 - N_r = 1800 - 1760 = 40 \text{ (rpm)}$$

$$f_s = f_0 - f_r = 30 - 29.33 = 0.67 \text{ (Hz)}$$

誘導電動機が p 極で、すべり周波数が f_s のとき、ある回転子バーが固定子巻き線により生じる回転磁極を相対的に通過する周波数は次式となる。

$$f_{pole} = f_s p = (f_0 - f_r) p \quad (5)$$

この周波数 f_{pole} (Hz) は極通過周波数と呼ぶ。式(5)を式(1)、(3)を用いて次式のように表す場合もある。

$$f_{pole} = \left(\frac{2f_{line}}{p} - 2(1-s) \frac{f_{line}}{p} \right) p = 2sf_{line} \quad (6)$$

この式から極通過周波数 f_{pole} は磁極数 p とは本質的に無関係であり、すべり s と電源周波数 f_{line} で表される。

前文の計算例のデータを用いると、極通過周波数

f_{pole} は次式となる。

$$f_{pole} = 2sf_{line} = 2 \times 0.022 \times 60 = 2.64 \text{ (Hz)}$$

固定子スロット数を n_s とすると、回転子のスロット通過周波数 f_{SP} は $f_{SP} = n_s f_r$ となる。

固定子スロット数 $n_s = 42$ 本とすると回転子のスロット通過周波数 f_s は次式となる²⁾。

$$f_{SP} = n_s f_r = 42 \times 29.33 = 1231.9 \text{ (Hz)}$$

3. 誘導電動機固定子電流信号の計測と解析

3.1 固定子電流信号計測から解析までの流れ

電気室の配電盤から電動機へ電力を供給する配線にクランプ式電流センサを設置し、電流計測ユニットにより固定子電流のアナログ信号をデジタルに変換して、上位PCまたはクラウド(TM-CLOUD[®])の仮想サーバーに送信する。そしてPCまたはクラウドの仮想サーバーは解析ソフトにより電流信号の解析を実行し、回転機械系の状態監視診断を行う。電流信号計測、通信、解析の一例として、当社のクラウド型T-MCMA[®]監視診断システムを図3に示す。図中のVFC-1[®]はTM-CLOUD[®]と連動したインターフェースである。当システムは回転機械の設置現場で信号を計測する必要がなく、機械構造と現場環境の影響を受けないため、他の監視診断技術のセンシング問題を一挙に解決した³⁾。

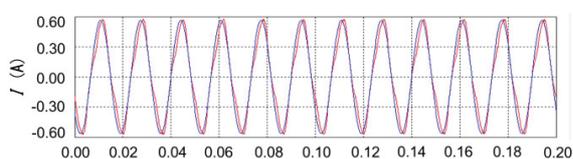
3.2 固定子電流信号解析の概要

電動機固定子の実測電流信号の時系列波形とそのスペクトル (赤) を図4に示す。この例では電源周波数 $f_{line} = 60$ Hzである。図4(a)で電源周波数 f_{line} と同じ周波数の正弦波時系列波形 (青) を重ね書きすると、実測電流の時系列波形は正弦波からわずかに歪んだ形状であることがわかる。T-MCMA[®]ではこのような微弱な電流変化を捉える。

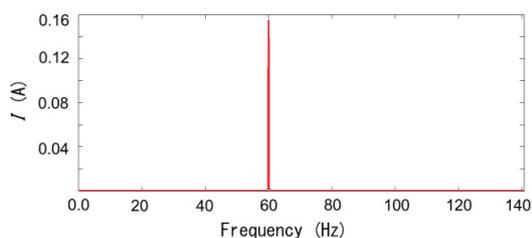
この図4(a)の実測電流信号のFFT処理による振幅スペクトルを図4(b)、(c)に示す。縦軸を線形目盛で示した図4(b)では、図4(a)の電流時系列波形の歪みにより予想される電源周波数 f_{line} 以外の成分はほとんど判別できない。しかし、図4(c)のように縦軸を対数で示すと時系列波形の歪みによる電源周波数 f_{line} 以外の成分は強調され、ノイズの他に電源周波数 f_{line} の成分を基本として、両側に対称的なピークが現れる。このような成分を側帯波といい、電動機・回転機械系の状態監視診断の重要な情報となる。



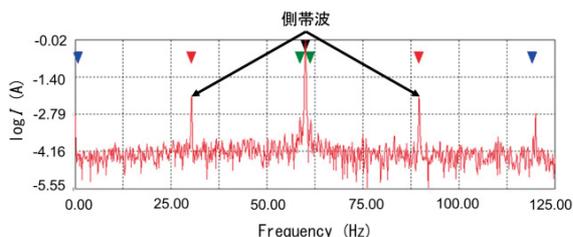
図3 電流情報量監視・診断システム



(a) 実測電流信号時系列波形と正弦波の比較



(b) 実測電流信号のスペクトル (線形表示)



(c) 実測電流信号のスペクトル(対数表示)

図4 固定子電流信号の時系列波形とスペクトル

3.3 固定子電流信号の相互作用

固定子巻き線の電流には、電源から供給される駆動電流信号の他に、電動機回転機械系の様々な状態変化により生じる逆起電力による電流信号が含まれ、この逆起電力による電流成分によって様々な周波数で現れる。また、固定子巻き線の電流信号は、駆動電流信号と逆起電力による電流信号の相互作用により脈動を伴う時系列信号で現れることもある。ここではまず、こ

の脈動を伴う時系列信号を変調前の周波数の信号に別の周波数の信号が影響を与えたものとみなし、信号の振幅変調として説明を行う。変調前の周波数成分(周波数 f_c) を $Y = A \cos 2\pi f_c t$ とし、影響を与える周波数成分(周波数 f_1) $X = B \cos 2\pi f_1 t$ とすると、変調後の信号 Z は次式となる。

$$Z = Y(a + X) = A \cos 2\pi f_c t (a + B \cos 2\pi f_1 t) \quad (7)$$

$$= a A \cos 2\pi f_c t + A B \cos 2\pi f_c t \cos 2\pi f_1 t$$

この変調前の信号の周波数 f_c は基本周波数と呼ぶ。以下では、固定子巻き線の電流信号の現れ方を式(7)の定数 a が $a = 1$ の場合(基本周波数成分が現れる場合)と $a = 0$ の場合(基本周波数成分が現れない場合)の二つのケースに分けて特徴を示しておく。

ケース1: 基本周波数が現れる場合

$a = 1$ の場合(基本周波数成分が現れる場合)、式(7)は次式となる。

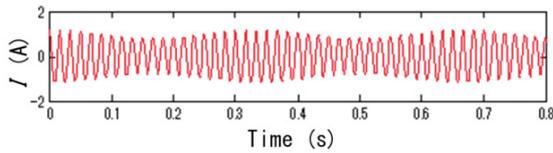
$$Z = A \cos 2\pi f_c t + A B \cos 2\pi f_c \cos 2\pi f_1 t \quad (8)$$

$$= A \cos 2\pi f_c t + \frac{1}{2} A B \cos 2\pi (f_c + f_1) t + \frac{1}{2} A B \cos 2\pi (f_c - f_1) t$$

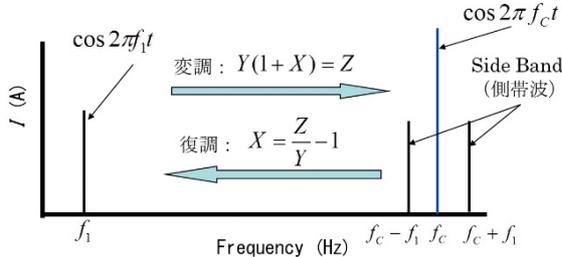
図5(a)にこの場合の時系列波形を示し、図5(b)にそのスペクトルを示す。このケース1では、基本周波数 f_c の両側に実信号の周波数 $f_c \pm f_1$ の側帯波が現れる。また、式(7)を変形した次式により、変調後の信号 Z から復調により変動分 X を取り出すことができる。

$$X = \frac{Z}{Y} - 1 \quad (9)$$

図5(b)には振幅変調の特徴に加え、復調の原理も併せて示している。



(a) 電流時系列信号と振幅変調



(b) 周波数領域における振幅変調の特徴と復調

図5 信号の振幅変調と復調のイメージ

ケース2：基本周波数が現れない場合

$a = 0$ の場合（基本周波数成分が現れない場合）、式(7)は次式となる。

$$Z = AB\cos 2\pi f_c \cos 2\pi f_1 t \quad (10)$$

$$= \frac{1}{2}AB\cos 2\pi(f_c - f_1)t + \frac{1}{2}AB\cos 2\pi(f_c + f_1)t$$

この場合、信号 Z のスペクトルには基本周波数成分が現れず、 $f_c - f_1$ と $f_c + f_1$ の周波数成分のみが現れる¹⁾。

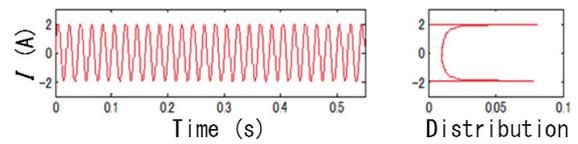
4. T-MCMA[®]の基礎理論と診断技術

4.1 診断用パラメータの種類

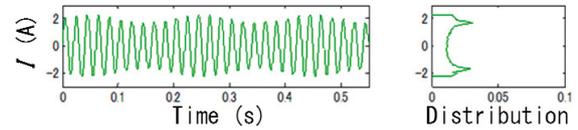
T-MCMA[®]は計測した電動機固定子電流信号に対して、時間領域と周波数領域の解析を行う。時間領域の解析結果として、3種類のパラメータ KI 、 I_{rms} 、 I_{ub} を算出する。また、周波数領域の解析結果として、5種類のパラメータ L_{pole} 、 L_{shaft} 、 IHD 、 THD 、 L_x を算出する。合計8種類のパラメータを用い、回転機械状態の簡易診断と劣化傾向管理を行う。

4.1.1 時間領域のパラメータの定義

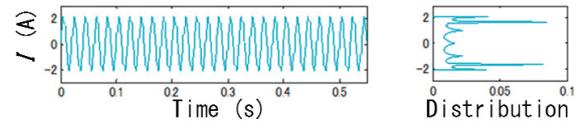
電動機回転機械系の状態が変化すると、固定子電流値がかならず変化するとは限らないが、電流時系列波形の形の変化がよくある。図6に正常状態（正弦波）と各種異常状態の電流時系列波形シミュレーション結果とその確率密度分布を示す。図6より正常状態の確率密度分布の形は各異常状態と明らかに違う。この確率密度分布の形の相違を定量評価することができれば、回転機械系の状態判定に大変有用と考えられる。



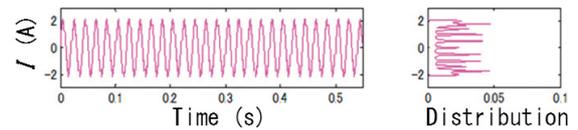
(a) 理想な電流時系列波形と振幅確率密度分布



(b) ロータバー損傷電流時系列波形と振幅確率密度分布



(c) ノイズ混入電流時系列波形と振幅確率密度分布



(d) 複合異常電流時系列波形と振幅確率密度分布

図6 各種状態の電流時系列波形のシミュレーションとその振幅確率密度分布

正常状態と点検状態との二つの電流時系列波形の確率密度分布関数の相違、すなわち「距離」を表すために、情報量 KI (KI : Kullback-Leibler information) を用いる。正常状態の電流時系列波形の確率密度分布を正常分布、点検状態の電流時系列波形の確率密度分布を点検分布と定義する。ここで、振幅 x の電流時系列波形に対して、正常分布と点検分布をそれぞれ $f_n(x)$ 、 $f_i(x)$ とすると、 KI の定義は

$$KI = \int_{-\infty}^{\infty} f_n(x) \log \frac{f_n(x)}{f_i(x)} dx \quad (11)$$

となる。

KI の定義により二つの確率密度関数が全く同一の場合、すなわち、 $f_n(x) = f_i(x)$ とすると、 $KI = 0$ となる。点検状態は正常状態と推定できる。 $f_n(x)$ と $f_i(x)$ との相違が大きくなると、 KI も大きくなる。この場合には、点検状態は異常状態の確率が高いと推定できる。この KI を電流情報量診断の総合判断用パラメータとして、活用している。特に、振動診断無力の流体回転機械の流体系の異常に対して、高い状態識別能力を有することがわかった³⁾。

I_{rms} は固定子電流の実効値であり、回転機械系の負荷・運転状態変動を監視するパラメータである。 I_{ub} は三相電流のアンバランスであり、電源品質、インバータの劣化、固定子の絶縁劣化などを監視するパラメータである。

4.1.2 周波数領域のパラメータの定義

周波数領域のパラメータの定義を説明する。電流時系列波形のFFT解析結果では、低周波領域の一例を図4(c)に示す。同図より、基本周波数は電源周波数(60 Hz)である

一番高いピークを中心として、両側に異なる周波数成分の対称的なピークがいくつか現れる。これは3.3節で紹介したように、回転機械系のいろいろな異常現象による逆起電力成分と駆動電流成分の相互作用により発生した振幅変調の現象である。一般的に異常状態が酷くなると、逆起電力が高くなる。すなわち、側帯波 f_{band} 成分が高くなる。駆動電流 f_{line} 成分は比較的に安定するため、電源周波数 f_{line} 成分と側帯波 f_{band} 成分の差を用いて、回転機械系の異常程度を評価することができる。この評価指標は次式となる。

$$L = -20 \log \frac{I_{band}}{I_{line}} = 20 (\log I_{line} - \log I_{band}) \quad (12)$$

ここで、 I_{band} は側帯波 f_{band} のピーク値である。指標の値を正にするため、-をつけて用いることに注意する。

(12)より L_{pole} , L_{shaft} , L_x をそれぞれ定義する。定義の詳細について、4.3 精密診断の中で解説する。

4.1.3 電流信号の高調波解析

電動機固定子電流信号周波数解析では、電源周波数を基本波とし、その整数倍 (N : 次数) を高調波と定義する。理想的な交流電源であれば、高調波成分が存在しないが、実際の交流電源には高調波成分がかなり含まれる。そして、電源の品質が良くない場合や電動機の固定子絶縁劣化が発生している場合には、この高調波成分の含有率が高くなる。高い高調波成分は電動機の異常振動、電磁音や発熱などの問題を引き起こす。この高調波成分の特徴を調べることを高調波解析と呼ぶ。

T-MCMA[®]では、高調波解析に用いられる二つのパラメータを紹介する。一つ目は最大高調波成分の含有率を評価する単調波比率 IHD であり、二つ目は全高調波成分の含有率を評価する全調波比率 THD である。

単調波比率 IHD は高調波電流成分の最大値 $I_{h \max}$ と電源周波数成分 I_{line} の比を取る次式を用いる。

$$IHD = \frac{I_{h \max}}{I_{line}}, I_{h \max} = \max [I_2, I_3, \dots, I_N] \quad (13)$$

全調波比率 THD は高調波電流成分の2乗和の平方根を取り、これと電源周波数成分 I_{line} との比を取る次式を用いる。

$$THD = \frac{\sqrt{\sum_{n=2}^N I_n^2}}{I_{line}} \quad (14)$$

この高調波次数を上限 $N=30$ で算出している。これらの単調波比率 IHD と全調波比率 THD は、電源品質の評価に加え、電動機固定子の絶縁劣化評価にも用いられる。

4.2 簡易診断と傾向管理

T-MCMA[®]の主画面兼簡易診断画面を図7に示す。8種類のパラメータにより回転機械の簡易診断を行う。すべてのパラメータは予め設定した判定基準と比較し、注意レベル領域に入ると黄色に着色し、危険レベル領域に入ると赤色に着色するとともに、お客様が登録されたメールに警報を送信することも可能である。

パラメータの算出結果は常にデータベースに保存されており、最新の計算結果と過去一定期間のデータをすべて参照できる表示機能がある。四つのパラメータを一画面で表示する。その一例を図8に示す。

最新の計測結果が一番右にプロットする。図の中にある黄色線は判定基準の注意レベルであり、赤線は危険レベルである。図中のポイントをクリックするとそ

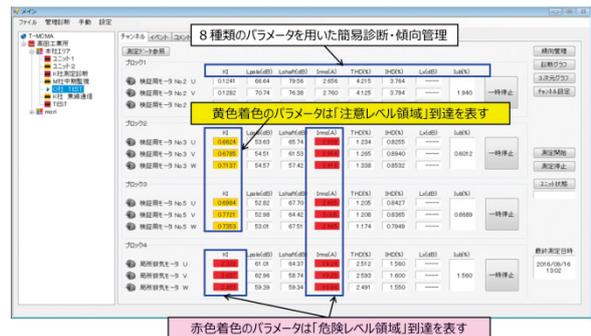


図7 T-MCMA[®]主画面兼簡易診断画面

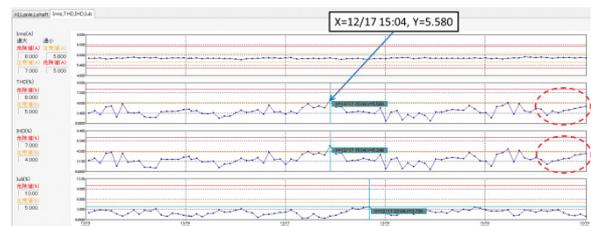


図8 T-MCMA[®]の劣化傾向管理グラフ

のパラメータの計測日と値が表示される。傾向管理グラフからそれぞれのパラメータの過去と直近の変動状況を観察することができ、回転機械の状態変化をより正確に把握できる⁴⁾。

4.3 精密診断

T-MCMA[®]はいろいろな精密解析・診断機能を備えている。これらの解析結果として、簡易診断・傾向管理用パラメータの算出・表示および精密診断グラフの詳細確認と原因究明を提供する。

4.3.1 電動機回転子バー損傷の検出

回転子バーの損傷が発生したときの電動機固定子電流信号のスペクトル特徴を2.2節の計算結果を用い、図9に示す。電源周波数 f_{line} 成分の周りに f_{band} の側帯波成分が生じる。側帯波の周波数 f_{band} は次式で表される。

$$f_{band} = f_{line} \pm f_{pole} = f_{line} (1 \pm 2s) \quad (15)$$

極通過周波数成分の電流ピーク値を I_{pole} とすると、回転子バーの損傷度合の評価指標 L_{pole} は式(12)により次式となる。

$$L_{pole} = -20 \log \frac{I_{pole}}{I_{line}} = 20 (\log I_{line} - \log I_{pole}) \quad (16)$$

評価指標 L_{pole} が48dB以下になると、回転子バーに損傷があると推定できる。

4.3.2 軸系ミスアライメント・回転体アンバランス診断

電動機と負荷側回転機械とを接続するカップリングにミスアライメントが発生したときの電動機固定子電流信号のスペクトル特徴を図10に示す。電源周波数 f_{line} 成分の両側に回転周波数 f_r 、 $2f_r$ だけ離れた側帯波が現れる。回転周波数成分の電流ピーク値を I_{shaft} とすると、ミスアライメントの評価指標 L_{shaft} は式(12)により次式となる。

$$L_{shaft} = -20 \log \frac{I_{shaft}}{I_{line}} = 20 (\log I_{line} - \log I_{shaft}) \quad (17)$$

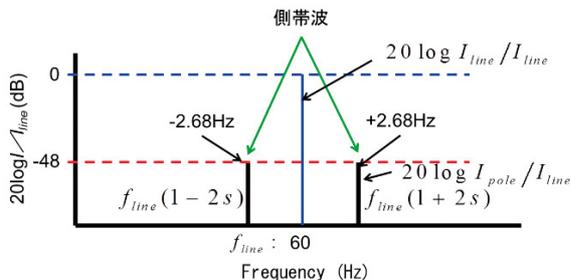


図9 回転子バー損傷時のスペクトル

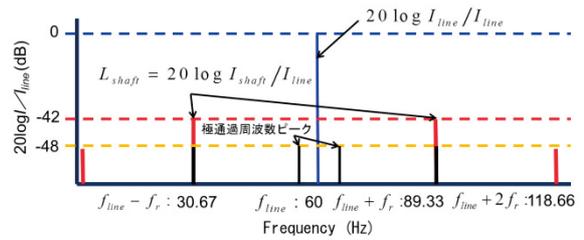


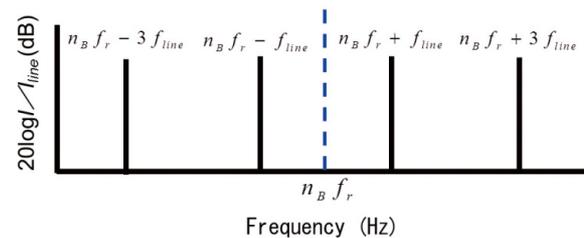
図10 ミスアライメントとアンバランスの診断

例えば、フランジタイプのカップリングの場合、 L_{shaft} は48dB以下になると同時に $f_{line} \pm 2f_r$ のピークを確認できれば、回転軸系のミスアライメントが発生していると推定でき、周波数 $f_{line} \pm f_r$ のピークが上がり続けると、軸系上の回転体のアンバランスが発生していると推定できる。

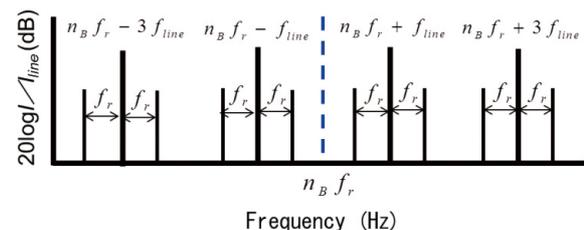
L_x は最新の診断解析ソフトに四つまで定義できる。例えば、ベルト通過周波数、歯車の噛み合い周波数、ポンプインペラのブレード通過周波数などの成分を監視したい場合には、式(12)を用いて、それぞれ定義する。

4.3.3 電動機回転子の静的偏心と動的偏心

回転子の偏心には静的偏心と動的偏心の2種類がある。回転子静的偏心の電流信号スペクトル特徴を図11(a)に示す。静的偏心は高い周波数領域の電流スペクトルから診断できる。回転子バーの本数 n_B と回転周波数 f_r を用いると静的偏心の特徴周波数 f_{SE} は f_{line} の奇数倍の成分の側帯波として次式のように現れる。



(a) 回転子静的偏心の特徴



(b) 回転子動的偏心の特徴

図11 回転子偏心の電流スペクトルの特徴

$$f_{SE} = n_B f_r \pm i f_{line} \quad (18)$$

ここで、 $i=1,3,5\cdots$ (奇数次) である。診断解析画面上に f_{SE} 周波数成分が現れると静的偏心が発生していると推定できる。

動的偏心では、エアギャップの一番狭い箇所が回転子の回転に伴って移動するため、動的偏心の基本周波数 f_{BD} は $n_B f_r \pm f_r$ となる。このときの電流スペクトル特徴を図11(b)に示す。動的偏心の特徴周波数 f_{DE} は次式で表される。

$$f_{DE} = f_{BD} \pm i f_{line} = n_B f_r \pm i f_{line} \quad (19)$$

T-MCMA[®]診断グラフ上に f_{DE} 周波数成分が現れると回転子の動的偏心が発生していると推定できる。

4.3.4 電動機固定子の異常

固定子の典型的な異常は、巻き線緩みと鉄心の破損などがある。巻き線緩みは機械的にコイルの絶縁に損傷を与え、巻き線間の短絡の原因になる。固定子に機械的あるいは電気的な劣化がある場合、固定子のスロット本数を n_s とすると、固定子のスロット通過周波数 $f_{SP} = n_s f_r$ から回転子の回転周波数だけ離れた側帯波によって識別できる場合があり、その固定子異常の特徴周波数 f_{ST} は次式となる。

$$f_{ST} = f_{SP} \pm f_r = n_s f_r \pm f_r \quad (20)$$

図12に固定子異常時の電流スペクトルの特徴を示す。診断解析画面上に特徴周波数の側帯波が現れると、固定子に何らかの異常が発生していると推定できる。

4.3.5 転がり軸受の診断

T-MCMA[®]で転がり軸受の損傷が見つかった場合、その軸受の損傷状態は通常、かなり進行しているため、その危険度が高く、できるだけ早く対策を施すべきである。

振動診断のように転がり軸受の特徴周波数はそれぞれ、内輪欠陥周波数 f_{inner} 、外輪欠陥周波数 f_{outer} 、転動体自転周波数 f_{ball} と保持器回転周波数 f_{cage} がある(計算式は参考文献参照)。上記4種類の特徴周波数を f_{pass} で代表して表すと、T-MCMA[®]で現れる転がり軸受の

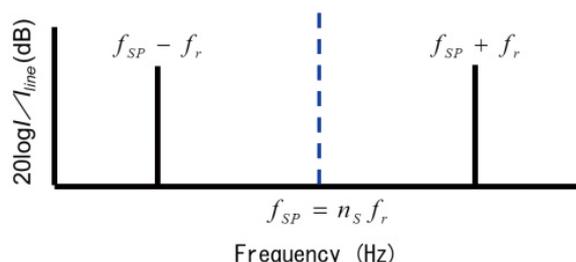


図12 固定子異常時の電流スペクトルの特徴

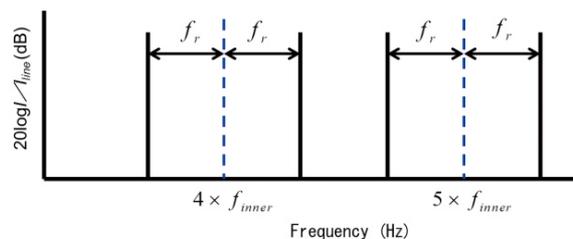


図13 軸受内輪損傷時の電流スペクトルの特徴

異常特徴周波数 f_{BSB} は、 $i f_{pass}$ ($i=1,2,3,\cdots$) の基本周波数の周りに電源周波数 f_{line} だけずれた側帯波として、次式のように現れる。

$$f_{BSB} = i f_{pass} \pm f_{line} \quad (21)$$

経験的には、 i は5まででよく、特に $i=3\sim 5$ 倍の側帯波が現れやすい傾向がある。図13に軸受内輪損傷が発生した場合の電流スペクトルの特徴を示す。

ただし、4.3.3~4.3.5の高周波領域で異常検出のパターンは3.3節で検討したケース2のように、基本周波数成分が現れないことに注意する¹⁾。

5. おわりに

当社は3年間の基礎研究を経て、MCSAを発展・進化させ、2010年3月に電流情報量診断システムを試作した。その後、6年を掛けて、化学、石油化学、鉄鋼、電力、食品、公共施設など多分野にわたり、現場実用検証を行いながら、機能改善と新機能開発を継続的に実施した。そして、2016年4月から「電流情報量診断システムT-MCMA[®]」としてスタンドアロン型とオンプレミス型の2種類の商品を発売し、2019年4月から「TM-CLOUD[®]」としてクラウド型診断技術サービスをお客様に提供し始めた。現状、数十社のお客様がT-MCMA[®]、TM-CLOUD[®]を導入され、活用されている。昨年度まで、数十機種、4000台近くの回転機械系の診断実績を蓄積してきた。T-MCMA[®]のオンライン監視・診断機能を用い、重要回転機械の突発防止ができたお客様から高い評価をいただいた。

現在、当社は研究開発を重ね、AI手法を活用し、診断システムの更なる改善・改良を行っている。DX時代に最適な監視診断システムを継続的にお客様に提供し、お客様生産プラントの安全安心な操業と予知保全に貢献していく。

※VFC-1[®]、T-MCMA[®]、TM-CLOUD[®]は、株式会社高田工業所の登録商標です。

参考文献

- 1) 井上剛志, 兵頭行志編著, 劉 信芳共著: 機械システムの状態監視と診断技術, 日本機械学会編, コロナ社, pp.222-245 (2021)
- 2) 豊田利夫: 電流徴候解析MCSAによる電動機駆動回転機の状態診断, 高田技報, Vol.20, No.1, pp.3-6 (2010)
- 3) 劉 信芳, 馮 芳, 中村孝博: 誘導電動機の電流信号による回転機械系の監視診, 機械学会第15回評価・診断に関するシンポジウム講演論文集, pp72-75 (2016)
- 4) 劉 信芳: 電流情報量診断システム, 検査技術, Vol.27, No.7, pp26-32 (2022)



劉 信芳 Xinfang LIU
技術本部



馮 芳 Fang FENG
技術本部 診断サービス技術部