

先端的スペクトル解析

電流シグネチャ・アナリシス

種々の業界が機器の障害を特定し予測するための新たな方法を捜し求め続けているため、予知保全設備のメーカーはそれぞれの利用可能な技術を増やそうと新しいツールを開発している。電動機に供給された線電流から情報を引き出す方法が新たに開発され、機器の電氣的・機械的状態に関する情報が得られるようになった。線電流によって、電源や電動機だけでなく負荷および軸線コンポーネントの奥深くまで情報を追跡しトレンドングを行うこともできる。この論文はこれらの新たな電流復調方法について述べ、それらが今日の工場設備に存在する電氣的・機械的異常を特定するのにどのように用いられているかを示す。さらに、この新機能が振動・電力解析に関連する機械部門と電気部門間のコミュニケーションの壁を取り除くのにどれほど役立つかについて述べる。

1985 年以来、電流シグネチャ・アナリシス (CSA) は誘導電動機の損傷した回転子およびエアギャップ偏心を特定するための好適な予知保全ツールとして発展してきた。CSA は固定子と回転子間のエアギャップの変化がエアギャップ磁束を通して電動機の電流シグネチャに跳ね返り、逆起電力 (CEMF) に影響を与えるのを観察することによって行われる。そして次に、CEMF に生じた変化が流れている電流を変調させて、誘導電動機を効率的な変換器に変える。電動機の電流に高速フーリエ変換 (FFT) を行うことによって、電源ケーブルは予知保全用途のために永久的に取り付けられた試験導線としての役割を果たすことができる。

FFT とは、時間領域信号から周波数情報を引き出し、それを周波数領域に変える数学演算である。周波数領域はある一定の周波数における信号の振幅のグラフである。周波数領域では、ピークの高さは信号の振幅を表す。図 1 に時間領域 (t)、周波数領域 (f)、振幅 (A) の関係を示す。

- 1) 時間領域の測定
- 2) 周波数領域の測定

図 1: 時間、周波数、振幅の関係

回転子バーの損傷

CSAでは、取り込まれた信号にFFTを行った後に、線周波数 (F_L) を取り囲む側波帯として極通過周波数 (F_P) が現れる。固定子の同期磁気パターンは回転子ケージより高速で回転する。これは、滑り周波数の一回転で磁極のすべてが任意の回転子バーを通ることを意味する。その速度を F_P と呼ぶ。振動解析ではしばしば、この用語は電動機極通過周波数 (PP_F) と呼ばれる。 ($PP_F = \text{電動機滑り} \times \text{極数}$)。 F_L と F_P の振幅の差は回転子の健全さを表している。実証的研究によって、54dB以上の差は回転子が健全であることを意味するが、45dB未満の場合は回転子に劣化がある（すなわち、接合箇所の抵抗が大きい、あるいはバーに割れまたは破損がある）ことを意味することがわかっている。回転子が損傷していることを示すCSAの例を図2に示す。

- 1) 周波数(Hz)
- 2) F_P 側波帯
- 3) 振幅(dB)

図2: 回転子が損傷している電動機のスペクトル

固定子-回転子間エアギャップの偏心

エアギャップの偏心は電動機の固定子と回転子間の無視できないほどの距離を表す。製造会社はエアギャップ偏心を最低限に抑えることに細心の注意を払っている。大型誘導電動機の標準的な最大レベルは5~10%である。偏心には静的と動的の2つのタイプがある。静的偏心とは回転子が固定子内径とずれている場合のように、最低エアギャップが空間に固定されている場合を指す。動的偏心とは最低エアギャップが回転子とともに回転する場合を指す。回転子が曲がっていると、動的偏心を生じる。固定子内径の全長と回転子間の距離が円周全体を通して同じでない場合、エアギャップ内の磁束の変化によって電流の流れに不均衡が生じ、それを電流スペクトルにおいて特定することができる。この状態の影響は電動機に電力を供給する線周波数の不ぞろいな高調波の多重側波帯として現れる。これらの側波帯は偏心周波数(F_{ECC})の周りに現れる。

$$F_{ECC} = (\text{回転子バーの数}) \times (\text{RPM}/60)$$

図3に過剰なエアギャップ偏心で稼動している電動機のCSAの結果を示す。偏心が激しくなるにつれて、ピークの振幅が増す。

1) 偏心スペクトル (dB) — MP1940A 07/21/2003 08:19:28AM

2) 振幅[dB]

図 3: エアギャップ偏心のある電動機の電流スペクトル

機械機器

モータの巻線を通る電流信号を調整してフィルターをかける能力を開発すると、CSA を負荷変動の検出にまで拡大できる。負荷変動は機械的プロセスに関係する。このプロセスに用いられる用語は復調である。復調とは変調された搬送波から信号を元に戻すプロセスである。変調とは変調波によって搬送波(電動機にかけられた 60Hz)のある特徴を変える (CEMF を生じさせる回転子磁束)プロセスである。簡単に言えば、一定の周波数で繰り返される負荷変動は電動機の CEMF によって固定子の電流に反映される。60Hz の信号を取り除くと、これらの周波数は明白になる。信号の 60Hz 部分を取り除くこと (搬送波周波数の復調) によって分析のために反復的な負荷変動を明らかにすることができる。

PdMA は現在、EMAX テスタの能力を大幅に拡大するために電流信号の振幅復調を用いている。60Hz 信号を取り除くためにソフトウェア制御式の復調を用いると、電動機速度、極通過、機械的通過および反射周波数を検出する能力が大幅に高められる。このような機械的周波数と反射周波数はベルト、歯車、ポンプ、ファン、およびその他の機械機器からの負荷変化に関係する。これらの周波数の振幅を評価するために、分析のためスペクトルにもたらされた復調信号に FFT を行う。復調が行われなければ、これらの負荷に関連する周波数の多くは取り込んだデータの信号対雑音比の中に埋もれてしまう。

機器の状態を評価するために電動機電流の復調を用いた次の例は公共の大型水族館のものである。データはPdMA CorporationのMCEMAX電動機テスタで先端的スペクトル解析 (ASA) を用いて集められた。機械機器を監視するのに復調電流解析を用いる場合、機器が申し分のない状態であることがわかっている場合の基準を設定することが重要である。特定の機器と状態に関連する周波数を確認した後、振幅に大幅な増加があるかどうか調べなければならない。

回転子の不均衡・ミスアライメント

極数によって AC 誘導電動機の速度が決まる。60Hz 線周波数で作動する 2 極 AC 誘導電動機は 3600RPM、すなわち毎秒 60 サイクル (Hz) よりやや低速で回転し、4 極電動機は 1800RPM、すなわち 30Hz 以下の速度で回転するといった具合である。電流の復調を用いることによって、電動機の速度をスペクトルのピークによって確認し振幅の変化を監視することができる。適切に均衡がとれ正しく位置合わせされた電動機が有するその速度に関連した周波数ピークはかろうじて見える程度であるが、電動機に不均衡やミスアライメントがあると、このピークの振幅が大きくなる。この状態が激しくなると、速度周波数の倍数が復調電流スペクトルに現れる。図 4 および 5 に、ポンプと電動機の正確な位置合わせを行った場合の動作速度と 2 倍の動作速度の振幅の変化を示す。

1) 復調スペクトル — PF-7.1 08/26/2002 09 : 53 : 51AM

2) 1X 動作速度 19.8Hz

0.0181dB

3) 周波数 (Hz)

図 4 : 位置合わせ前の復調電流スペクトル

図 5 : 位置合わせ後の復調電流スペクトル

ベルト

電動機に取り付けたベルトを通して負荷に動力を伝える場合、復調電流スペクトルを用いて位置合わせの変化を評価することができる。電流スペクトルの評価は、ベルト周波数の振幅の増大とベルト周波数の倍数の発生が何か異常があることのしるしであるという点で位置合わせと似ている。ベルト周波数を計算するには、操作者は電動機に取り付けられたプーリーの直径とベルトの長さを知る必要がある。

$$\text{ベルト周波数} = 3.142 (D/L) \times (\text{RPM}/60)$$

D は電動機に取り付けられたプーリーの直径

L はベルトの長さ

RPM は電動機の速度

下記の例で、駆動ベルトの張りを適切に調整し位置合わせを正しくした後に復調電流スペクトルが劇的に変化することがわかる。図 6 では、ベルト周波数は 8.188Hz で、ベルト周波数の倍数でピークの上昇がある。図 7 で、調整後にベルト周波数の倍数が消え、ベルト周波数の振幅が少なくなったことに注目されたい。これらの周波数は容易に監視することができ、このシステムのベルトドライブに生じ得る異常を検出することができる。

復調スペクトル

1) 1 X ベルト速度

491RPM すなわち 8.188Hz

0.0031dB

2) 振幅 [dB]

3) 周波数

図 6： ベルト調整前の復調電流スペクトル

図 7： ベルト調整後の復調電流スペクトル

ファン・渦巻きポンプ

ファンブレードと渦巻きポンプのベーンの周波数は、 F_p にブレード（またはベーン）の数を掛けたものに等しい周波数での復調電流スペクトルで監視することができる。この周波数での振幅の増加および電動機速度周波数のピークにおいて起きる可能性のある増加はブレードまたはポンプのベーンに損傷があるかもしれないことを暗示している。ポンプまたはファンを最初に取り付けた後、またはそれらが満足のいく状態にあることを確認した後、ベーン周波数を確認し、ピークの振幅を記録すること。これで機器の基準振幅が設定されたので、復調電流スペクトルが簡単且つ効率的な機器監視手段として用いられる。

図 9 および 10 に 2 台の同一の横型ポンプの比較を示す。図 9 はポンプベーン周波数の振幅が 0.027dB のこの用途で標準的な場合である。図 10 では、PF-8.6A ポンプのポンプベーン周波数の振幅は 0.046dB で、これはその他のすべての同一機器の基盤のほぼ 2 倍である。PF-8.6A ポンプに、追加試験を行い、現在のところインペラの検査を予定している。

1) F_p 1.9Hz x ベーン 6 枚 = 11.4Hz

0.027dB

2) 電動機速度 1180RPM、すなわち 19.67HZ

図 8： いくつかの同一ポンプの標準的電流復調スペクトル

図 9： インペラの損傷が疑われるポンプの電流復調スペクトル

電動機土台のゆるみ

基礎ボルトが緩んでいたたり、足部が不安定であったり、台板がゆがんでいたたりすると、電動機にエアギャップの偏心を招くおそれがある。電動機が正しく取り付けられていないと、時間とともに、電動機の温度上昇と低下に伴う熱膨張・収縮によりフレームにゆがみが生じることがある。さらに、電動機の土台がしっかりしていないと、動力を与えられた負荷との正しい位置合わせをほとんど維持できなくなる。電動機の土台の緩みは復調電流スペクトルにおいて電動機の動作周波数の半分でピークが上昇することによって検出することができる。このピークの振幅が時間とともに増加しているようなら、電動機の土台、取り付けボルト、およびシムを点検したほうがよい。

図 10 は、ポンプに動力を供給する誘導電動機の実り付けボルトに緩みがあると推定される場合の復調電流スペクトルである。電動機が土台に適切に実り付けられていれば、このピークはまったく目に見えない。復調電流スペクトルにこのピークが確認された場合、それは電動機の土台の徹底的な点検が必要であることを示唆している。状態がもっと悪くなると、周波数ピークの振幅が増大する。

1) 電動機速度は 3570RPM すなわち 59.5Hz

動作速度の 1/2 は 1785RPM すなわち 29.75Hz

0.0739dB でのこの 1/2 の上昇動作速度ピークは土台を点検すべきであることを示している。

図 10： 土台に緩みがある電動機・ポンプの電流復調スペクトル

電動機軸受

ころ軸受は独特の欠陥周波数を有しており、軸受を評価する場合、電流復調にこれらの周波数が用いられる。周波数は軸受のサイズとデザインに基づいている。これらの周波数は軸受の内輪、外輪、ボール（ローラー）および保持器に欠陥がないかを見るために監視される。内輪、外輪、およびボール周波数を計算するには表 1 に示す式を用いる。

表 1

BPFI = ボール通過周波数、内輪

BPFO = ボール通過周波数、外輪

FTF = 基本列周波数

BSF = ボールスピン周波数

Bd = ボール直径

Pd = 軸受のピッチ円直径

n = ローリングエレメントの数

θ = 接触角

周波数を計算するためのこれらの式は、軸方向の負荷とずれが予測不可能な仕方で周波数に影響を与えるため、やや不正確である。寸法と接触角が正確であることを確認するために、軸受メーカーからの技術資料を綿密に調べる必要がある。データがない場合はメーカーに問い合わせること。軸受メーカーは自社が製造したすべての軸受についてこれらの周波数を提供することができる。

ただし、最も一般的な玉軸受の場合、軸受周波数の近似値は次のとおりである：

外輪欠陥 = (ローラーの数) x (RPM/60) x (0.4)

内輪欠陥 = (ローラーの数) x (RPM/60) x (0.6)

基本列周波数 = (0.4) x (RPM/60)

この場合もずれと接触角の変動を明らかにする必要がある。これらの変動によって、実際の軸受周波数は多少上下する場合がある。復調電流スペクトルを用いてこれらの周波数の監視を開始する場合、エンベロープまたはバンドは推定軸受周波数の±10%となるようにすること。復調電流スペクトルを用いてこれらの軸受周波数を監視することができ、また

振幅の増加があれば検査を要するが、実際の軸受の状態を判断するための詳細な分析は振動分析器を用いて行うべきであると承知しておくことが重要である。

結論

電動機の電流を解析することによって、保全機関の効果と効率を効果的に高めることができる。この分野からの実験によるデータが多く集められてくるにつれて、電動機の入力線を用いることによって機械機器を監視することができることがいっそう明らかになってきている。電流解析をその他の予知保全設備と共に使用すると、データの収集に費やされる工数が減らされて費用の大幅な節約になる。ベルト、歯車、位置合わせ、およびその他の機械機器を監視するのに電流解析を用いることができる。電流解析におけるこれらの新機能を使って、振動・電気解析に関連する機械部門と電気部門間のコミュニケーションの壁を取り除いていただきたい。