

## 3.2 事例

# 今こそ高調波診断

新田 純也

設備が異常・劣化を来たしているとき、その部位や劣化度合いに従って特定の次数の高調波を設備は出している。例えばモータの機械系に異常・劣化が生じると偶数次（2次、4次）の高調波が強く立ち、モータの電気系部位に異常・劣化が生じると奇数次（3次、5次）の高調波が強く立ってくる。この電源電流に重畳される高調波を捉えて分析すると、設備の部位毎の異常・劣化度合いを診断出来る。従って、この異常・劣化度合いを傾向管理することで、設備の異常・劣化の予知が可能となる。設備が異常・劣化を来すと、電力効率が悪くなり消費電力が増加することになる。これを事前に手を打つことによって、消費電力の増加を抑えることになり、省エネ・省資源が実現出来る。

また、投入する電力とその負荷がする仕事とのエネルギー・バランスの関係が正常であれば、定格運転であるが、この需給バランスが崩れると、無駄な電力消費または過負荷運転となり、省エネから遠ざかることになる。需給バランスを監視することによって、早期メンテナンスが可能となり、かつ省エネ活動につながるのである。

### 国際エネルギー機関報告

国際エネルギー機関（IEA）の最近の調査により、世界の消費電力の45%をモータが占めていることが明らかになった。モータはポンプ、ファン、コンプレッサー、コンベアなどさまざまな産業機器に組み込まれ、しかも大量にエネルギーを消費していると言うこの数字は衝撃的である。全

世界の発電所の2基に1基はモータを稼働するためにだけ発電していることになる。

IEAの研究は、多くのモータは依然として非効率であり、モータの電力消費の20%~30%の削減は可能であり、この削減可能な電力は世界中の電力消費量の9%~14%に達するとしている。

ただし、モータの電力消費の削減はさまざまな障壁によって困難であるとIEAは指摘している。そこで、簡便にエネルギー・バランスを診断できる高調波診断器は強力なツールであるといえる。

## 高調波診断

電流中に重畳される高調波をピックアップし、FFT処理を行い、各調波のパワースペクトルを求めます。これにより、各調波の含有率を計算します。

※含有率は基本波を100とした時のパーセンテージです。

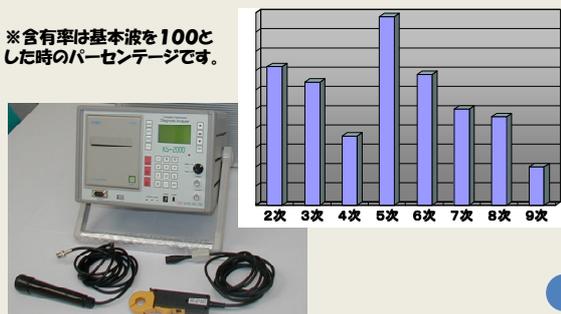


図1. 高調波診断器と含有率

電源電流に重畳される高周波を測定・分析（図1）することで、設備異常を予知ができ、負荷バランス診断により定格運転が可能になり、これらの活動を通じて結果的に、省エネが達成できる。これらの理論的背景を簡単に解説する。

## 高調波の特性

高調波とは、基本波の整数倍の周波数を持つ波のことを言う。関西の商用周波数は60Hzである、2次の高調波とは120Hzの周波数をもつ波、3次の高調波とは180Hzの周波数をもつ波のことである。ノイズはアットランダムであるが、高調波はかならず規則性を持つ。高調波診断は、2次から40次までの高調波を用いて、設備を止めずに活線・非接触状態で、電気設備の異常・劣化を診断する技術である。

## 設備診断

高調波診断は、人間の血液検査と同じである。血液を採取分析することで、病気の特異や進行を知ることができる。電気設備の場合、電流が人間の血液に当たる。電源電流に重畳される高調波を測定・分析することで異常・劣化の部位やその程度が診断出来る。

純粋な電源には、奇数次の高調波しか存在しないが、モータの機械部（軸受や軸）が異常・劣化を起こすと、偶数次の高調波が強く立つ。一方、ホコリだらけのモータや設備は、その効率を落としているが、その時、逆相の5次高調波が強く立ってくる。3相交流設備のインバータの平滑電解コンデンサーが十分機能していないと、6次高調波が強く立ってくる。

何次の高調波が強く立っているかで、部位の特定を、部位に関連する高調波がどの程度立っているかで、異常・劣化の程度を知ることがこれまでの知見によって可能である。

## エネルギー・バランス

モーターと負荷のバランスはとれていますか？  
投入した電力と負荷がする仕事のバランスが悪いと劣化を早めたり、故障が発生しやすくなります。特に低位モードは省エネの観点からも改善が必要な運転状態です。

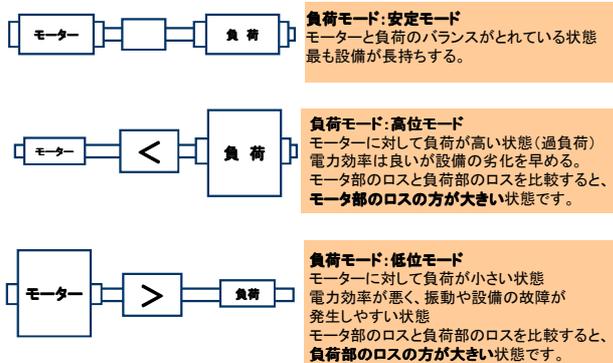


図2. エネルギー・バランス

負荷モード（運転モード）という言葉は、造語

である。モータと負荷の関係（エネルギー・バランス）と言い、図2の通りの関係であるが、2つの見方で定義することができる。

## 【定義1】

設備に投入された電力は、モータ部では以下のような損失が発生する。鉄損、銅損、軸受・軸の摩擦等。一方負荷部では、軸受・軸の摩擦、排管の詰まりや吐出バルブの開閉等。この時、モータ部でのロスと負荷部でのロスを比較したとき、相対的にどちらのロスが大きいかで負荷モードを定義する。モータ部のロスが負荷部のロスより大きい場合を高位モード、逆に、負荷部のロスの方が大きい場合を低位モードと定義し、同程度の場合を安定モードと定義する。

## 【定義2】

投入された電力が効率良く仕事に変わっている場合は安定モード。度が過ぎて、オーバーロード気味なのが高位モード。効率が悪く十分に仕事に変わっていない場合が低位モードである。

いずれにしても、低位モードの設備を見つけて、運転状況の見直しやメンテナンスによって、安定モードに持って行くことが、大きな省エネに繋がるのである。

また、部位の劣化と言う観点から、高位モードはモータ機械部の異常・劣化に注意、低位モードはモータ電気系の異常・劣化に注意すべきである。

## 総合診断

高調波診断器導入によって次の総合診断（ADS診断）が可能となる。

- 1) A診断：Abnormal（異常）診断
  - ①負荷や構造物との共振
  - ②アンバランス
  - ③不安定振動
  - ④アライメント変化
  - ⑤巻線の熱振動・流体振動
- 2) D診断：Deterioration（劣化）診断
  - ①ベアリング・軸受部グリス
  - ②ベルト・歯車
  - ③直流電動機ブラシ・整流子
  - ④モールド変圧器
- 3) S診断：Energy Saving（省エネ）診断
  - ①負荷モードから負荷ロスを判定
  - ②高調波データから効率低下率算定

## HAMOS の紹介

HAMOSは弊社アルカディア・システムズが開発した高調波診断器と分析ソフトが一体になった状態監視システムである。各種特許を取得し、多数の企業に導入実績がある。HAMOSの特徴を以下に紹介する。

### 電気設備保全の要件

第一に、稼働中の設備の状態把握が必要となる。どの設備も一律に時限的に更新を行うよりも、個々の設備ごとに状態を監視して大きな事故を未然に防ぎつつ、適正な対策を施し、機器寿命の延長を図って使用限界まで設備を利用することで保全の経済性を高める。この時の設備診断は、設備の停電を必要としない運転状態で行うオンライン診断でなくてはならない。

第二に、稼働中の設備の効率評価が必要になる。高調波診断技術は、機器の電力バランスを計測することにより省エネ性を評価する。そして、設備の高効率運転により電力使用量の削減を可能にする。

第三に、稼働中の設備の状態監視は安全に行われなくてはならない。高調波診断は設置設備と離れた場所にある制御盤内のリード線に非接触で高調波センサーを向けて計測するので安全であり、また巻線の絶縁や静止器の評価も可視的に行える。プラントの安全性の更なる向上のために、状態監視技術に革新をもたらした。

### HAMOS の機能

高調波診断技術を用いた状態監視予知保全システムHAMOSの機能概要を次に示す。

#### 1) 予知

高調診断の部位毎の管理数値は一般的に異常・劣化が進展すると大きくなる。この数値をグラフ化し、予想劣化曲線を引くことで、重度障害になるのは何ヶ月後かを推定できるのである。

#### 2) 負荷バランス

電気設備の寿命を延長させてコスト低減を図ることもさることながら、生産性の向上、環境保全の観点からも重要性が再確認されてきている。電力バランスを負荷モード（高位モード、安定モード、低位モード）で評価し、設備を安定モードにて稼働させれば、設備損失が最小になる。また、

効率が平均 3~10%向上するため、省エネに適した設備運転ができるという省エネ革新を推進する最適なシステムである。

#### 3) 突発事故防止

HAMOS のもう一つの特徴は、異常データの発生を関係部門に速やかに配信し、突発事故を防ぐことである。突発事故が発生すると、生産ラインがストップし、その間の生産機会の損失や、時間的、人的ロスは計り知れない。その意味で、突発事故を防止することが一番の省エネになると言い得る。

#### 4) 見える化

①測定した高調波は各次数毎のパワースペクトルにグラフ化される。何次の高調が強く立っているかが一目瞭然である。

②部位毎の管理数値や劣化度によるグラフ化が可能である。その勾配から劣化のスピードが推定でき、予知につながる。

③劣化パターングラフとのマッチングにより、専門家でなくても設備の診断が可能である。

④どの程度運転効率を落としているかを簡易計算しメンテナンスの効果が一目で分かる。一般的な簡易な計算方法は次の通りである。

$$\text{ロス} = \sqrt{(H5^2 - H7^2)} \quad [\%]$$

H5：逆相の5次高調波含有率

H7：正相の7次高調波含有率

## 省エネ診断の適用事例

### 【事例1】

対象設備： 片吸込渦巻ポンプ

機器仕様： 2.2KW 4P 絶縁E種

設備全体は経年劣化状態で、負荷部（ポンプ）のベアリングのみを新品に交換する。交換の前後で高調波診断を実施した。

事例1. 高調波診断測定結果

負荷部ベアリング 交換前 → 交換後

部位	項目	レベル	値	スコア	交換後	スコア	
モーター部	1. 回転軸・軸受、据付	B2	70%	0.512	B1	51%	0.497
	2. 巻線の絶縁(相間)・振動	B1	42%	0.363	A	29%	0.298
	3. 軸受・ハウジング損傷	B2	65%	0.343	B1	52%	0.355
	4. エアークリップ不均一	A	31%	0.308	A	18%	0.243
負荷部	1. カップリング、軸アライメント	A	1%	0.104	A	1%	0.148
	2. 軸受損傷、異物付着	B2	77%	0.112	A	1%	0.146
	3. 回転軸異常、バルブ磨耗	A	38%	0.108	A	1%	0.134
	4. 歯車・ベルト系損傷	A	1%	0.101	A	1%	0.133

図3. 負荷部軸受交換

図3はHAMOSが出力した結果の対比を表した。A, B, は劣化度評価であり、%表示は劣化度合を示している。

【診断】：軸受損傷、異物付着の項、初期劣化レベル (B2,77%) であったが、交換後はAレベルへと改善、負荷部ベアリング交換により、かなりの設備振動が抑えられ、モータ部全体の数値も改善されているのが見られる。

表1. 高調波含有率

次数	5次	7次	総合
交換前高調波含有率	12	05	4.1
交換後高調波含有率	0.7	0.7	3.6

表1の交換前5次と7次の高調波含有率より  
 $\text{交換前ロス} = \sqrt{(1.2^2 + 0.5^2)} = \sqrt{1.19} = 1.1\%$   
 ここでの高調波含有率とは、基本波の大きさをレファレンスとした時の値で、総合歪率を100とした時の百分率ではない。

交換後ロス =  $\sqrt{(0.7^2 + 0.7^2)} = 0.0\%$   
 負荷部のベアリング交換後、負荷部の影響によるロスは0%となった。また、カップリング・軸アンバランスの項が、0.104から0.148に上昇したのは、モータ部でのロスと負荷部でのロスを比較した時、負荷部のロスが改善できたので、相対的にモータ部でのロスが大きくなったことを示している。

【事例2】

対象設備：片吸込渦巻ポンプ

機器仕様：2.2KW 4P 絶縁E種

設備全体は経年劣化状態で、モータ部反負荷側のベアリングのみを新品に交換する。交換の前後で高調波診断を実施した。

事例2. 高調波診断測定結果

		交換前		交換後	
モータ部	1. 回転軸・軸受、摺付	B2	70%	0.504	B1 57% 0.446
	2. 巻線の絶縁(相間)・振動	A	27%	0.285	B1 51% 0.405
	3. 軸受・ハウジング損傷	B2	65%	0.335	B2 60% 0.323
	4. エアークリップ不均一	A	31%	0.308	A 21% 0.258
負荷部	1. カップリング、軸アンバランス	A	1%	0.0888	A 1% 0.104
	2. 軸受損傷、異物付着	B3	89%	0.0967	B3 87% 0.113
	3. 回転軸異常、バルブ磨耗	A	27%	0.0912	A 19% 0.106
	4. 歯車・ベルト系損傷	A	10%	0.0897	A 1% 0.104

図4. モータ部軸受交換

【診断】：モータ部軸受は共にB2の初期劣化状態だったが、モータ部反負荷側軸受のみ交換後、70%から57%に改善されたが、負荷側の振動が残って

おり、数値が下がりきっていない。

表2. 高調波含有率

次数	5次	7次	総合
交換前高調波含有率	1.4	0.4	4.3
交換後高調波含有率	0.7	0.5	4.6

表2の5次と7次の高調波含有率より

交換前ロス =  $\sqrt{(1.4^2 + 0.4^2)} = \sqrt{1.8} = 1.34\%$

交換後ロス =  $\sqrt{(0.7^2 + 0.5^2)} = \sqrt{0.24} = 0.49\%$

モータ部反負荷側のベアリング交換によりロスは減少している。しかし、モータ部のロスと負荷部でのロスを比較した場合、未だモータ部でのロスが相対的に高いことを示している。対処方法としては、モータ部負荷側のベアリングにグリスを注入するか、又は新品に交換する必要がある。

【事例3】

対象設備：移送ポンプ

インバータ定格容量 15KW 運転周波数 58Hz

モータ定格容量 15KW、定格電圧 220V

インバータを含め、モータ電気系に劣化兆候がある、負荷部も経年劣化状態の設備であるが、インバータのみ交換した事例。

表3. 高調波含有率

次数	5次	7次	総合
交換前高調波含有率	32.3	2.8	36.5
交換後高調波含有率	6.9	1.2	8.4

表3の5次と7次の高調波含有率より

交換前ロス =  $\sqrt{(32.3^2 + 2.8^2)} = 32.18\%$

交換後ロス =  $\sqrt{(6.9^2 + 1.2^2)} = 6.79\%$

従って、インバータ交換によりロスが25.4%改善された。この改善による年間のCO2削減量は  $15\text{KW} \times 25.4\% \times 8\text{h} \times 365\text{day} \times 0.378\text{KgCO}_2/\text{kwh} = 4205\text{kgCO}_2/\text{年}$  となる。

機械系のメンテナンスもさることながら、電気系のメンテナンスはロスを改善する意味では、寄与率が非常に大きいといえる。

先のIEAの調査からも分かる様に、電気設備、特にモータのエネルギー・バランスを改善し、設備の運転ロスを小さくすることは、省エネを実現すると共に、それが、大きなCO2削減効果を生む。

高調波診断技術は、「システムの運転状態を簡単に評価できる」今求められる技術である。