

電気設備の高調波診断技術の開発と応用

Development and Application of Higher Harmonics Diagnosis Technology for Electric Equipment

アルカディア・シス テムズ株式会社	新田 純也	JUNYA NITTA	Non Member
シンビオ社会研究 会	吉川 榮和	HIDEKAZU YOSHIKAWA	Member

Abstract

A unique diagnostic technology for electric devices has been developed to detect anomaly and estimate the cause of failure of the device easily by analyzing the higher harmonics of electric source current. Higher harmonic diagnosis devices have been realized and improved to be served as the portable device for maintenance works of various electric equipment such as AC/DC motors, inverters, transformers, cables, *etc.* The higher harmonic technique has been expanded as the online cabled system so that it can serve as the online remote monitor and diagnosis system for the electric equipment. In future, it will be upgraded by endowing the self-learning monitoring and diagnosis capabilities by the adoption of IoT and deep learning.

Keywords:

higher harmonics, portable device, diagnostic of electric device, AC/DC motors, inverters, transformers, cables, online remote monitor and diagnosis system

1. 序論

今日の産業界で広範に使用されている電気設備の保全には、最近次のような課題が指摘されている。

- ・ 保全業務の技術継承が困難（高齢化、属人的作業）
- ・ 劣化部品の交換など表面的な対処が主体
- ・ 専門的で時間のかかる点検が必要な設備が存在
- ・ 記録作業が煩雑
- ・ 機器停止が必要で、繁忙期の点検作業は困難
- ・ 交換部品が入手しにくい老朽化設備の存在

本論文では、高調波診断技術により予知保全上記のような問題点を解決できることを提案する。

我が国で電気機器に用いられている交流は商用の場合、関東 50Hz、関西 60Hz が基本波であるが、これらの整数倍の周波数を持つ波を高調波という。2 次の高調波は 100Hz（120Hz）の周波数を持つ波で、3 次の高調波とは 150Hz（180Hz）の周波数を持つ波である。Fig.1 には基本波及び 3 次の高調波、5 次の高調波、それらを合成した波を示す。Fig.1 に示すように、実際の電気機器には基本波とは全く波の形が違ような高調波成分を含んだ合成波が流れる。通常の電気機器の使用では高調波成分が多い

と様々な故障をもたらすので電源の高調波を抑制する対策が講じられるが、本論文で述べる高調波診断技術はこのように高調波成分に着目して電気機器の設備診断に活用する方法である。

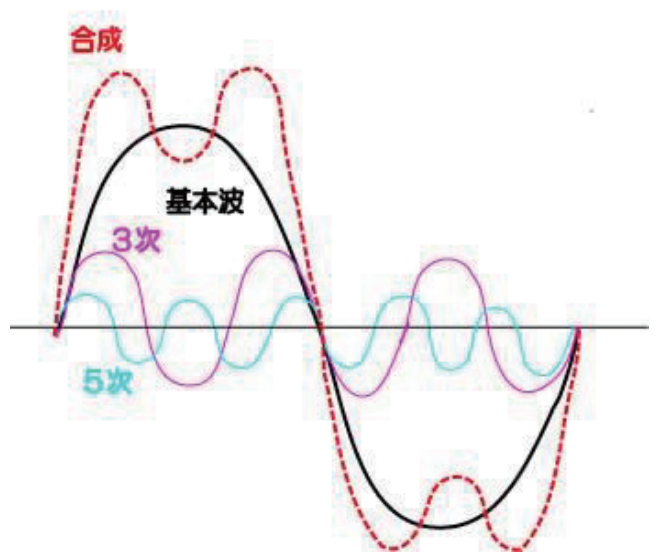


Fig.1 Basic sinusoidal wave, higher modes and the synthesized wave which flow in the electric equipment.

2. 高調波診断技術とは

本論文で述べる高調波診断技術は、電気設備の電源電流に重畳される2次から40次までの高調波を利用して、設備を止めずに診断する技術である。この方法の実用化は、高博により10年以上の歳月をかけて1万台以上の設備の高調波を測定し、設備を分解・検証した結果判明した電気設備の劣化箇所・劣化度合と高調波成分の比率についてデータを集積し、そのデータベースに基づいて有意な相関関係を導出する基礎的な研究があった。[1] 具体的には集積したデータベースに多変量解析の主成分分析を適用して、Table 1に示すような「寄与率表」を生成するものである。

Table 1 Contribution ratio table

劣化部位	第1次主成分寄与率	寄与する次数(得点順)										累積寄与率	
		寄与率											
モーター	回転軸・軸受・摺り付け	2次	4次	3次	5次							86%	
		55%	16%	9%	6%								
	固定子巻線の絶縁	3次	5次	2次	4次							95%	
		61%	22%	7%	5%								
	軸受・ハウジング損傷	4次	2次	3次	5次							82%	
41%		23%	10%	8%									
エアギャップ不均一	5次	3次	4次	2次							93%		
	59%	20%	8%	6%									
負荷側	カップリング異常・軸アンバランス	7次	10次	9次	8次	6次						91%	
		53%	15%	11%	7%	5%							
	軸受損傷・異物付着	8次	7次	9次	10次	6次						95%	
		35%	29%	13%	11%	7%							
	回転軸異常・ハルブ磨耗	9次	8次	7次	10次	6次						92%	
33%		25%	21%	8%	5%								
車・ベルト系損傷	10次	7次	8次	9次	6次						91%		
インバータ側	平滑コンデンサ	5次	7次									98%	
		62%	36%										
	コントロール基板	11次	17次	13次	25次	19次	23次						96%
		21%	19%	17%	15%	13%							
	電力素子	7次	3次	5次	17次	38次	11次	25次	19次	23次			99%
		17%	16%	13%	7%	7%	6%	6%	5%	5%			
			13次	2次	4次	6次	8次	9次	10次				
ドライブ基板	38次											89%	
	89%												

高博による10年間に渡る解析に用いられたデータは3万7千件に及ぶ。Table 1ではモーター本体、その負荷側、およびインバータ側における様々な部位の劣化事象における第一主成分(最も大きな高調波成分)と各高調波成分の寄与率と高調波成分の総和の寄与率を示す。

ここで高調波の次数とモーター部・負荷部の各部位との相関をFig.2に示す。モーターのロータに供給される3相交流がサーチコイルで測定するモーター軸、カップリングや

歯車、これらを介して負荷側に動力が伝達される各部位での劣化により生じる第一次成分とその他の大きな高調波および劣化事象をFig.2に示す。図中、モーターから負荷側へ左から右を見ると各部位の第一主成分が昇順に並んでいる。

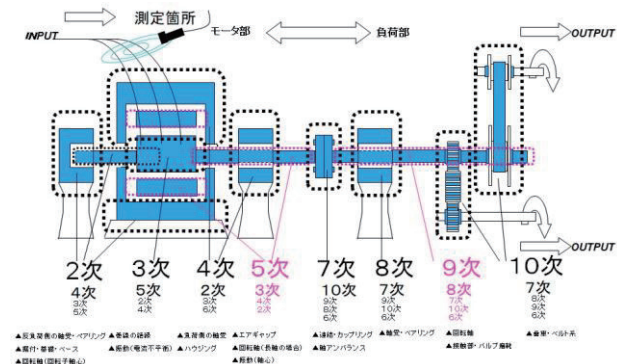


Fig.2 Relationship between the order of higher modes and the various parts of motor and load

高調波診断技術は、非接触・活線診断が大きな特徴であり、フェライトのコアにコイルが1500巻きされたサーチコイルで電源ケーブルの漏れ磁束を測定する。そしてこの測定は制御盤で高調波を測定するため、水中ポンプや天井ファン等のアクセスが困難な設備も簡単・安全に診断することができる。勿論設備を停止する必要はない。

軸の曲がりや絶縁劣化、発熱と軸受のグリス溶け出し等のように電気系の劣化と機械系の劣化とは密接に関連していることは広く知られているが、高調波診断技術によれば、機械系部位のみならず、電気系部位の設備の劣化診断が可能で、特に、汎用インバータの診断は、高調波診断技術だけが可能である。

高調波診断技術は「統計データ」に基づく診断技術のため、物理モデルのように原理原則により劣化現象を説明できないが、データのN数を増やし統計的に優位な相関が見いだせれば、現在は診断できない設備も将来は診断できるようになる。実際、この高調波診断技術が初めて登場した頃は、交流設備しか診断できなかったが、その後「電源トランス」や「コンデンサー」の診断まで可能になったのは、加速試験によりデータを増やして有意な相関が見いだされたためである。このことが強みであり、AIの機械学習等との親和性があると考えている。

高調波診断手法により診断できる交流設備・直流設備・トランス・コンデンサー・発電機・無停電電源と配電ケーブルの診断部位と主な異常・劣化原因をTable 2に示す。

Table 2 Electric equipment by higher harmonics diagnosis method
with the failed parts and cause of degradation.

設備	対象	診断項目	主な異常・劣化原因
交流設備	モータ	回転軸・軸受・据付け	回転子の偏心、据付け不良、反負荷側軸受損傷
		巻線の絶縁（相間／層間）・振動	相間／層間絶縁の不良、電圧不平衡、熱振動
		軸受・ハウジングの損傷	負荷側軸受損傷、ハウジングのガタ
		エアギャップ不均一・振動	塵埃付着、回転子の偏心、熱・流体振動
	負荷	カップリング異常・軸アンバランス	軸の摩耗、アンバランス、カップリング、ベルトのゆるみ
		軸受損傷・異物付着	軸受の損傷、負荷内部の異物混入・付着
		回転軸異常・バルブ摩耗	軸不良、吐出バルブ摩耗、負荷内部の異物付着
		歯車・ベルト系損傷	歯車、クラッチ、ベルトの損傷
	インバータ	平滑（電界）コンデンサ	脈流高調波、負荷変動
		コントロール基板	電界コンデンサ、コンデンサ、抵抗の変化
電力素子		整流素子、逆変換素子の劣化	
ドライブ基板		コンデンサ、抵抗の変化	
直流設備	モータ	回転軸・軸受・据付け	回転子の偏心、据付け不良、反負荷側軸受損傷
		ブラシ・整流子・巻線の絶縁、振動	相間／層間絶縁の不良、電圧不平衡、熱振動
		軸受・ハウジングの損傷	負荷側軸受損傷、ハウジングのガタ
		エアギャップ不均一・振動	塵埃付着、回転子の偏心、熱・流体振動
	負荷	カップリング異常・軸アンバランス	軸の摩耗、アンバランス、カップリング、ベルトのゆるみ
		軸受損傷・異物付着	軸受の損傷、負荷内部の異物混入・付着
		回転軸異常・バルブ摩耗	軸不良、吐出バルブ摩耗、負荷内部の異物付着
		歯車・ベルト系損傷	歯車、クラッチ、ベルトの損傷
	コンバータ	平滑（電界）コンデンサ	脈流高調波、負荷変動
		コントロール基板	電界コンデンサ、コンデンサ、抵抗の変化
電力素子		整流素子、逆変換素子の劣化	
ドライブ基板		コンデンサ、抵抗の変化	
トランス	電力用トランス	巻線（相間／層間）の絶縁、振動	巻線の絶縁劣化、巻線の局部加熱（振動）、電磁振動（鉄心）
		効率・発熱・絶縁油、振動	絶縁油劣化、渦電流損、発熱、振動現象による効率低下
コンデンサ	電力用コンデンサ	誘電体の絶縁	誘電体の絶縁劣化
		静電容量、発熱	静電容量抜け、誘電体損失の増加
発電機	発電機	回転軸・軸受・据付け	回転子の偏心、据付け不良、反負荷側軸受損傷
		巻線の絶縁（相間／層間）・振動	相間／層間絶縁の不良、電圧不平衡、熱・流体振動
		軸受・ハウジングの損傷	負荷側軸受損傷、ハウジングのガタ
		エアギャップ不均一・振動	塵埃付着、回転子の偏心、熱・流体振動
	原動機 （ディーゼル・タービン）	カップリング異常・軸アンバランス	軸の摩耗、アンバランス
		軸受損傷・異物付着	軸受の損傷、負荷内部の異物混入・付着
		回転軸異常・接触部摩耗	軸不良、接触部摩耗
		連結部異常	カップリング部異常、偏心
無停電電源	UPS	平滑（電界）コンデンサ	脈流高調波、負荷変動
		コントロール基板	電界コンデンサ、コンデンサ、抵抗の変化
		電力素子	整流素子、逆変換素子の劣化
		ドライブ基板	コンデンサ、抵抗の劣化
ケーブル	本体部	絶縁体	水トリリー・電気トリリー・化学トリリー、部分放電、疲労破壊（クラック）、局部過熱、絶縁低下、電気特性低下
		銅テープ	損傷・熱変形
		シース	損傷・浸水、蟻害・鼠害
	接続部	ケーブルヘッド	部分放電、トラッキング、
		ジョイント	絶縁低下、汚損、変形、亀裂
	施工	施工	外傷・工事
		設置	異物・浸水
		経年	外圧・変形

3. 実例による高調波診断方法の説明

高調波診断は電気設備の正常時の高調波と異常・劣化時の高調波の比較により、異常・劣化の部位と原因を診断する。以下では (1)反負荷側のモータ軸受け、(2)モータの巻き線、(3)インバータの電力素子について述べる。なお、電気設備の正常、異常の判断や劣化程度に関する指数などのパラメータの計算方法は、次の4にまとめて述べる。

3.1 反負荷側のモータ軸受け

反負荷側軸受（正常品と異常・劣化品）の比較を Table 3 に示す。表中の基準値では寄与率表より寄与率を含有率と見なして指数を計算する。

Table 3 Comparison of higher mode contribution factor between normal equipment and abnormal/degraded one for ball bearing of anti-load side

基準値	高調波次数	2次	3次	4次	5次	PTHD
	寄与率指数	0.944	0.154	0.274	0.103	58.29
ポンプ (正常品)	高調波次数	2次	3次	4次	5次	THD
	高調波含有率(%)	3.1	2.6	1.3	2.1	9.7
	指数	0.32	0.269	0.13	0.216	—
ポンプ (軸受劣化品)	高調波含有率(%)	2.7	1.4	1.1	2	4
	指数	0.675	0.35	0.275	0.5	—

指数 = H_n / THD (H_n : 第n次高調波含有率、THD: 総合歪み率)

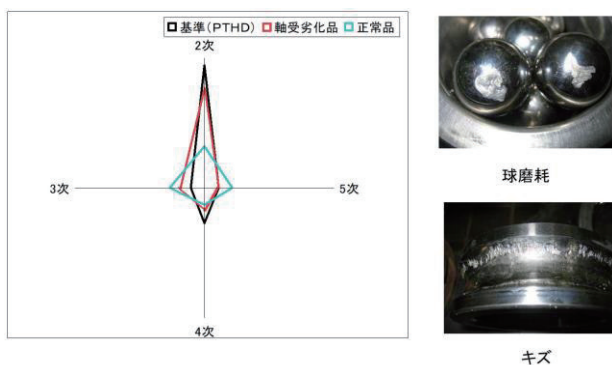


Fig. 3 Graphical comparison of higher mode contribution factor between normal equipment and abnormal/degraded one for ball bearing of anti-load side

診断に関する正常品は、典型的な正常設備が示す含有率より指数を計算し、劣化品は実際の測定値より指数を計算する。それぞれの指数を2次から5次までグラフ化

し、正常品と劣化品を比較したものが Fig.3 である。青線のグラフは正常品、赤線のグラフは軸受けが劣化したポンプである。黒線は劣化を軸受け劣化と診断する際に用いる基準であり、4で述べる PHTD を示す。Fig.3 より軸受け異常ポンプは2次高調波が特徴的に大きい。この劣化したポンプを分解した結果、軸受けの球形ボールリングには摩耗がみられ、ケーシングの外輪には傷が観察された。

3.2 モータの巻き線

Table 4 はモータ巻き線の正常品と異常・劣化品を比較したものである。

Table 4 Comparison of higher mode contribution factor between normal equipment and abnormal/degraded one for motor's winding

基準値	高調波次数	2次	3次	4次	5次	PTHD
	寄与率指数	0.107	0.933	0.076	0.336	65.41
ファン (正常品)	高調波次数	2次	3次	4次	5次	THD
	高調波含有率(%)	8.2	9	3.9	2.6	25.7
	指数	0.319	0.351	0.152	0.101	—
ファン (巻線劣化品)	高調波含有率(%)	9.8	206.3	7.8	15.7	207.7
	指数	0.047	0.993	0.036	0.076	—

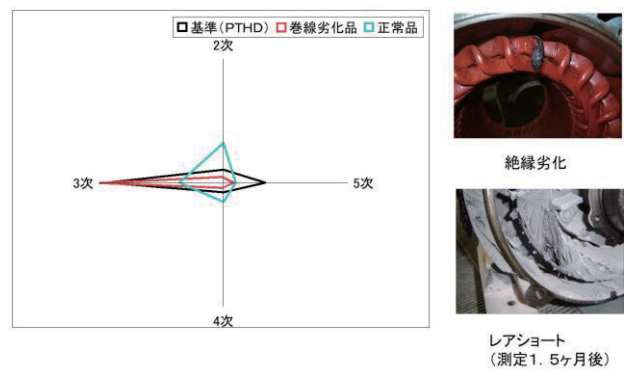


Fig. 4 Graphical comparison of higher mode contribution factor between normal equipment and abnormal/degraded one for motor's winding

モータ巻き線部の寄与率を基準値とし、典型的な正常品の含有率及び実際の測定データの含有率からそれぞれ指数を計算し、それぞれの指数を2次から5次までグラフ化したものを Fig.4 に示す。青線のグラフは正常品、赤線のグラフは軸受けが劣化したポンプである。黒線は劣化を軸受け劣化と診断する際に用いる基準である。Fig.4 よりモータ巻き線の異常は第3次高調波が特徴的に大きい。

この測定の前月にこのモータは、焼損した。分解して調べた結果、その原因はレアショートであった。(Fig.4 右側写真の下側)

3.3 インバータの電力素子

インバータの電力素子について同様に寄与率表、典型的な正常品の含有率及び測定した設備の含有率から、それぞれの指数を計算した結果をTable 5に示す。この場合、指数の次数を2次から38次までフラフ化したものがFig.5である。関連する次数が多いので分かりにくい、3次、5次、7次の奇数次が特徴的に大きい。

この設備は、測定1ヶ月後に電力素子が焼損した。

Table 5 Comparison of higher mode contribution factor between normal equipment and abnormal/degraded one for inverter's power element

高調波次数	2次	3次	4次	5次	6次	7次	8次	9次	10次
寄与率指数	0.096	0.511	0.064	0.415	0.064	0.543	0.064	0.064	0.064
高調波次数	2次	3次	4次	5次	6次	7次	8次	9次	10次
高調波含有率(%)	6.9	1.8	2.1	2.2	2.6	4	2.3	1.6	0.9
指数	0.638	0.167	0.194	0.204	0.241	0.37	0.21	0.148	0.083
高調波次数	11次	13次	17次	19次	23次	25次	38次	PTHD	
寄与率指数	0.192	0.128	0.224	0.16	0.16	0.192	0.224	31.29	
高調波次数	11次	13次	17次	19次	23次	25次	38次	THD	
高調波含有率(%)	2	1.4	0.7	0.6	0.7	1.6	0.2	10.8	
指数	0.185	0.13	0.065	0.056	0.065	0.148	0.019	—	
高調波含有率(%)	3.2	2.7	2.1	1	0.5	1.3	0.3	28.9	
指数	0.111	0.073	0.224	0.035	0.16	0.045	0.01	—	

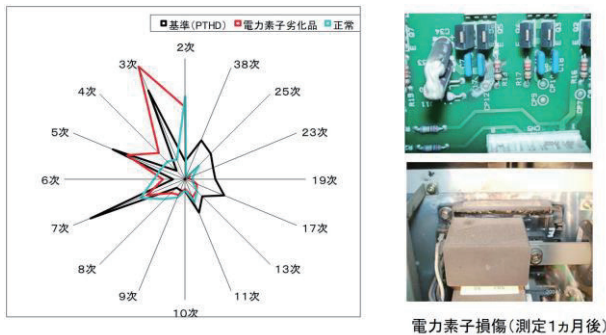


Fig.5 Graphical comparison of higher mode contribution factor between normal equipment and abnormal/degraded one for inverter's power element

4. 指数値の計算方法

4.1 測定した高調波含有率と各指数値との関係

測定部位に近づけてサーチコイルに流れる誘導電流を求め、それをFFTにかけて高調波成分を求める。利用する測定値は、2次から40次までの高調波含有率(Hn)のみである。(Hnは第n次高調波含有率(%))指数を計算

する場合、この高調波含有率を総合歪率(THD)で予め割り正規化しておく。THDは各含有率の二乗和の平方根($\sqrt{\sum H_n^2}$)として計算される。なお、事例中のPTHDは寄与率表より関係する次数のみで計算した値である。

4.2 ストレス電圧E(fn)の算出

本方法では劣化を起こしうる電気機器の各所の部位に掛かると思われる誘起電圧をストレス電圧と称し、このストレス電圧と高調波含有率の間には経験的な線形相関式を仮定する。どのような要因が劣化を起こすかについては次の4.3に述べる以下では代表的な電気機器の各部位にかかるストレス電圧と高次の高調波含有率との相関式モデルを示す。

①モータ側

回転軸・軸受のストレス電圧: E (M1)

巻線絶縁のストレス電圧: E (M2)

軸受・ハウジングのストレス電圧: E (M3)

エアギャップのストレス電圧: E (M4)

$$\begin{bmatrix} E(M1) \\ E(M3) \end{bmatrix} = K_M \begin{bmatrix} a & b & c & d \\ e & f & g & h \end{bmatrix} \begin{bmatrix} H_2 \\ H_3 \\ H_4 \\ H_5 \end{bmatrix} \quad (1)$$

$$\begin{bmatrix} E(M2) \\ E(M4) \end{bmatrix} = K_E \begin{bmatrix} i & j & k & l \\ m & n & o & p \end{bmatrix} \begin{bmatrix} H_2 \\ H_3 \\ H_4 \\ H_5 \end{bmatrix} \quad (2)$$

但し、 K_M : 機械定数

K_E : 電気定数

②負荷側(モータ側に換算)

アンバランスのストレス電圧: E (L1)

軸受損傷のストレス電圧: E (L2)

回転軸のストレス電圧: E (L3)

歯車・ベルトのストレス電圧: E (L4)

$$\begin{bmatrix} E(L1) \\ E(L2) \\ E(L3) \\ E(L4) \end{bmatrix} = K_L \begin{bmatrix} a' & b' & c' & d' & e' \\ f' & g' & h' & i' & j' \\ k' & l' & m' & n' & o' \\ p' & q' & r' & s' & t' \end{bmatrix} \begin{bmatrix} H_6 \\ H_7 \\ H_8 \\ H_9 \\ H_{10} \end{bmatrix} \quad (3)$$

但し、 K_L : 負荷定数

③インバータ(モータ側に換算)

平滑コンデンサのストレス電圧: E (I1)

コントロール基板のストレス電圧: E (I2)

電力素子のストレス電圧: E (I3)

ドライブ基板のストレス電圧: E (I4)

$$[E(I_n)] = \begin{bmatrix} a'' & \cdots & 0 \\ \vdots & A & \vdots \\ 0 & \cdots & p'' \end{bmatrix} \begin{bmatrix} H_2 \\ \vdots \\ H_n \\ \vdots \\ H_{38} \end{bmatrix} \quad (4)$$

但し、Aは16行16列の行列

H_n は(n=2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9, 10, 11, 12, 13, 17, 19, 23, 25, 38)

以上の式(1)-(4)中の H_n は、第n次高調波含有率(%)を意味し、記号 $a \cdots p$ 、 $a' \cdots t'$ 、 $a'' \cdots p''$ は部位毎の寄与率である。

4.3 各指数値と異常・劣化の程度

上記で計算したストレス電圧が各指数値であり一般的には異常・劣化が進行すると指数値が大きくなる。

そこで、各指数値に異常・劣化を判断する閾値を設定することによって高調波診断が可能となる。

交流設備のモータ部の閾値表をTable 6に示す。

Table 6 The degree of abnormality and deterioration of the index value and the part of AC motor

異常・劣化の程度	判定	初期異常(劣化)レベル		注意レベル	整備必要レベル		
		A	B1		B2	B3	C
M1: 回転軸・軸受・据付		0.35	0.45	0.55	0.65	0.70	
M2: 巻き線の絶縁・振動		0.35	0.45	0.55	0.65	0.70	
M3: 軸受・ハイジング損傷		0.25	0.30	0.35	0.40	0.45	
M4: エアギャップ・振動		0.35	0.45	0.55	0.65	0.70	

交流設備のインバータ部の閾値表をTable 7に示す。

Table 7 The degree of abnormality and deterioration of the index value and the part of the inverter

異常・劣化の程度	判定	初期異常(劣化)レベル		注意レベル	整備必要レベル		
		A	B1		B2	B3	C
I1: 平滑コンデンサー		0.65	0.66	0.67	0.68	0.69	
I1: 平滑コンデンサー		0.40	0.35	0.30	0.20	0.10	
I2: コントロール基板		0.10	0.11	0.12	0.13	0.14	
I3: 電力素子		0.15	0.18	0.20	0.23	0.25	
I4: ドライブ基板		0.20	0.35	0.50	0.75	1.00	

なお、Table 6とTable 7は安定モード時の閾値表である。

4.4 ストレス特性の考察

①熱ストレス

部位の発熱によりもたらされる熱ストレスは最も基本的な劣化をもたらす要因である。熱ストレス現象の種類により劣化を起こす発生高調波の主要次数には次のような関係が見られた。

- ・ 局部加熱 → 奇数次高調波 (対称波)
- ・ 熱振動 → 奇数次高調波
- ・ 熱ひずみ → 偶数次高調波 (非対称波)

・ 振動 → 偶数次高調波

その他、電圧ストレスと機械ストレスについてそれぞれ以下に示す。

②電圧ストレス

- ・ 電磁力 → 奇数次高調波
- ・ 放電現象
 - 部分放電 → 偶数次高調波
 - グロー放電 → 奇数次高調波
 - アーク放電 → 奇数次高調波

③機械ストレス

- ・ 機械的ショック → 偶数次高調波
- ・ クリープ応力 → 偶数次高調波
- ・ 疲労破壊 → 偶数次高調波

5. 高調波診断技術の応用

5.1 可搬型の診断器

高調波診断技術を応用した可搬型装置は、保全担当者の子知保全の強力なツールとなりうる。高調波診断技術を応用した可搬型装置KSシリーズ診断器KS-2000を改造して外部制御を可能とした製品の外観と特徴をFig.6に示す。

高調波診断技術を応用した予知保全の診断装置


KS-2000A-KS-3000A

KS series

非接触型電気設備機器診断器

KS-2000A・KS-3000A

KSシリーズは、設備の状態を把握するセンシング技術と、異常を予測するための解析技術と、電流や電圧中の「高調波」を詳細に分析・診断し、数値化し、評価する診断器です。



【基本的な特徴】

- ◆ **予知保全・予知保全が可能**
異常状態・劣化状態の兆候を検知できるので、故障予測が可能です。
- ◆ **保守コストの軽減化**
技術的なスキルを必要とせず計測が可能のため、高い技術の保守要員を必要としません。
- ◆ **活線診断が可能**
設備停止を行わないため、調査が可能です。活線状態でしか測定できない劣化症状(過熱、放電現象、漏れ電流など)調査も可能です。

【導入メリット】

- ◆ 導入後における設備計画延命・更新立案に有効なデータを保全業務の中で効率良く収集が可能です。
- ◆ 定期点検の効率化が可能です。限られた時間内で必要な処置を確実に実施することが可能となるため、設備保全の品質の向上が可能です。
- ◆ データ収集により、設備の経年変化や環境変化に応じた対応が可能となるため、機械設備の予知保全と設備の延命化・性能の向上が計画的に実現されます。

Fig.6 Harmonic diagnosis machine

5.2 有線方式の状態監視システム化

保全担当者が現場機器に赴いて可搬型診断器で診断作業をする代わりに、遠隔で連続的に自動診断できるようになると保全担当者の負担の軽減になる。

有線の状態監視システムHAMOSは、Fig.7に示すようにnKS2000を中心に有線タイプで状態監視が行えるように構成したシステムである。運転中の電気設備に正常運

転時とは異なる高調波パターンが発生すると、保全担当者の携帯にそれを知らせるメールを自動送信する。勿論、診断結果報告書も自動生成する。

HAMOS は、高調波センサーから高調波診断器まで全て有線接続であり、その延長距離は約 100m である。高調波診断器に入力された漏れ磁束のアナログデータは高調波診断器内部で計算処理され、簡易診断結果が制御用パソコンに送られる。制御用パソコンはシステムの制御だけでなく、詳細診断や診断結果報告書作成機能、トレンドグラフ表示機能等を有する。

高調波診断技術を応用した状態監視システム

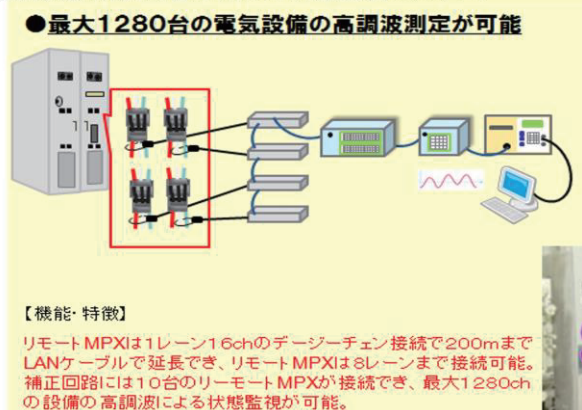


Fig.7 HAMOS

5.3 ユーザへの診断結果の表示

Fig. 7 に示した HAMOS では、まず、アナログマルチプレクサの制御及びデジタルマルチプレクサを制御して高調波診断器と監視対象設備に取り付けされた高調波センサーとを接続している。診断器は以下の順序で処理計算が実行される。

- ①電源の漏れ磁束をサーチコイルで測定する。
- ②FFT 処理により電源の高調波含有率を計算する。
- ③式 (1) から式 (4) により各指数値を計算する。
- ④Table 6 や Table 7 に示した異常・劣化閾値表により、各部の異常・劣化の程度を判定する。
- ⑤診断結果を管理ソフトに転送する。
- ⑥管理ソフトでは各部位の劣化傾向管理グラフ表示や出力、「劣化診断報告書」や「ストレス診断報告書」が作成され、プリントされる。

Table 8 に「劣化診断結果報告書」のサンプル例を示す。表中では劣化度 70%以上の部位は保全対象として出力されている。Table 8 中の【対策】は自動診断ソフトよりコメントが自動生成される。回転軸・軸受・据付けの項では、軸受グリス注入、負荷部の回転軸異常・接触部摩耗

の項の軸受のグリス注入、若しくは清掃することをコメントしている。

Table 8 An example of deterioration diagnosis report

診断項目	判定	異常・劣化(%)	評値
【モータ部】	回転軸・軸受、据付け	B2	78.9
	巻線の熱線(電圧・相間)・振動	B1	51.2
	軸受・ハウジングの損傷	B1	48.9
【負荷部】	エアギャップ不均一・振動	B1	43.9
	カブリング異常、軸アバランス	B2	62.3
	軸受損傷、異物付着	B2	77.8
	回転軸異常、接触部摩耗	B2	72.1
【インバータ】	電圧・電流変動	B1	51.4
	平滑(電線)コイルサ	B1	40.6
	コントロール基板	B1	42.5
	電力素子	B1	54.3
ドライブ基板	A	24.8	正常
【事象】	1次側負荷モード 高位(0.182)	2次側負荷モード 高位(0.123)	運転状態 正常運転
<p>■モータ部 モータ損失大 負荷変動やカブリングの芯ずれによるアンバランス振動(回転軸の曲がり)による影響で、回転軸・軸受にストレスの兆候有り(グリス変色、析出注意)。据付異常の兆候有り。 負荷共振(構造物との共振)、負荷変動によるアライメントの変化の影響により異常振動発生。</p> <p>■負荷部 モータ機械系(回転軸・軸受)への影響注意。 軸受損傷、異物付着の兆候有り。 回転軸異常(曲がり、疲労、亀裂)の兆候有り。</p> <p>■インバータ部 コンデンサのストレスは主に負荷変動や負荷共振に起因。</p>			
<p>■総合対策 【対策】 次の対策から可能なものを順次実施して下さい。</p> <p>■モータ部 1.軸受グリス注入。 2.モータ内部の清掃(エアブロー、他)。 3.軸受台、フレーム、架台、ダクトや配管の見直し(変更・改修)。 4.ファンの場合ダンプ調整、ポンプの場合バルブ調整。</p> <p>■負荷部 1.LX(軸受損傷、異物付着):軸受のグリス注入、若しくは清掃。 2.LX(回転軸異常):回転軸及び軸荷重の点検・調整。</p>			

Ver.C8.24/S7.00

6. 高調波診断技術の未来

6.1 高調波センサーの無線 IoT 化

これまで述べた有線方式の HAMOS はセンサーから高調波診断器まで全て有線接続で、アナログデータは高調波診断器内部で処理され、簡易診断まで実行している。

高調波センサーの無線 IoT 化では前処理とサーバへの転送のみを行うもので、新システムでは FEP-AMP から中継器 (IoT ゲートウェイ) まで無線方式で接続され、中継器ではデータの前処理のみ実行し、データの解析・診断機能はもたない。具体的には以下のような処理を行う。

サーチコイルの出力を FEP-AMP (フロントエンド・プロセッサ) に入れ 10KHz のサンプリングにより 12 ビットの AD 変換を行う。そしてこのデータを 920MHz で親機 FEP-AMP へ送信する。(FEP-AMP は子機にも親機にも内蔵ディップスイッチで切り替えが出来る設計になっている)。

親機を束ねる中継器 (小型の FA パソコン) では、次の 3 種類のデータを高調波診断サーバに転送する。

- ① 時間軸での粗データ (漏れ磁束の電圧波形)
- ② 周波数軸での FFT データ (中継器で電圧波形を FFT 処理を行う)
- ③ 高調波含有率にしたスペクトルデータ (中継器にて計算処理する高調波含有率データ)

6.2 高調波診断サーバの AI 化

前項 6.1 に述べた時間軸データ、周波数軸データはそれ

ぞれ次のような AI による機械学習に供される。

- ①従来の高調波含有率に基づく高調波診断を実行する。
(寄与率診断)
- ②FFT 処理波形は一度画像データとして保存し前処理後、
Google が公開している TensorFlow[2]により CNN
(Convolution Neural Network) により自動診断する[3].
- ④粗データ (電圧波形) の時間軸データは、同様に
Google の RNN(Recurrent Neural Network)により自動
診断する[4]

このような機械学習には、前処理とラベル付けが必要であるが、前処理には正規化とデータ数の一致、ラベル付けには寄与率診断を用いる。その結果、これは「正常な設備」のデータですよ、「これは絶縁劣化した設備」のデータですよ、といった意味づけが可能になる。

6.1 に述べた IoT 無線高調波センサーと、ここで述べた機械学習を応用した新しい状態監視システムのイメージを Fig.8 に示す。高調波センサーを無線化することの効果は大きく、応用範囲が飛躍的に広がる。例えば洋上風力発電の状態監視システムに適用できる。

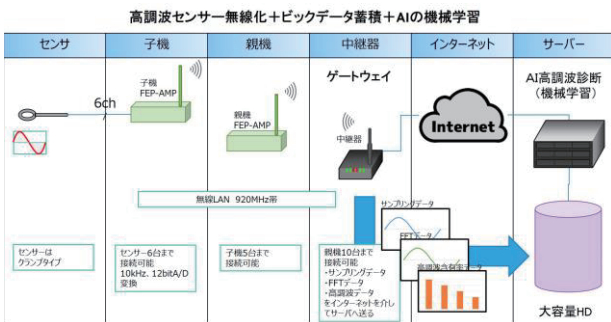


Fig.8 wireless IoT harmonic sensor and AI machine learning

以上述べたような AI 化により高調波診断機能は一段と高度化されるが、その目標とする機能は以下のものである。

STEP1: 電気設備診断における正常波形ばかりを機械学習する。学習が進むと異常な波形 (何時もと違う波形) がくるとアラートを発する。このような機械学習により正常な設備と異常な設備が振り分けられるようになる。

STEP2: 異常な設備でも例えばベアリングが劣化している設備の波形を機械学習する。このような学習により、異常な設備の中で、ベアリングが劣化している設備が振り分けられる。

以上の機械学習における STEP1 や STEP2 の処理は中間層とする。この時従来の高調波診断技術は「教師」役に

徹する。そしてこの中間層を多層化しディープラーニングすることで診断精度の向上を目指したい。

機械学習には「答えがあらかじめ分かっている」場合を「教師有り機械学習」、ビックデータを処理して「AI が何らかのルールを自分で見つけ出す」学習方法を「教師なし機械学習」と呼ぶが、提案する方法は、従来の診断方法でタグ付けする「教師有り機械学習」となる。

従来の診断方法は高調波のみに着目してシンプルでノイズに強い診断方法の一方で捨ててしまった情報がある。それは高調波と高調波の間の周波数情報である。FFT 波形を機械学習することは、高調波と高調波の間の周波数の情報も診断に利用して診断精度向上を期待している。

7. 結び

本論文では、各種電気機器の劣化診断を現場で非接触、短時間測定で容易に保全要員が実施できる高調波診断技術の基本原理と応用製品、将来の技術展望をまとめた。

高調波診断技術は、2017 年に他界した高博 が生前に 30 年に渡り、基礎研究からフィールドワークを重ねて確立した日本発の設備診断技術である。現在第一著者の属するアルカディア・システムズはその技術を受け継ぎ、状態監視システム HAMOS を試作開発した。今後は新たに IoT 無線化技術と AI 技術を付加し、より診断精度を高め予知保全技術の普及に貢献したいと考えている。この予知保全技術が、各社が抱える「保全の問題点」を解決する有効なツールとなることを期待している。

参考文献

- [1] 「高調波診断技術講習会テキスト」、エイテック株式会社 2004 年 10 月 18 日
- [2] TensorFlow by Google <https://www.tensorflow.org/>
- [3] 元田浩監訳 「パターン認識と機械学習 上」丸善出版 2012 年 1 月
- [4] 渡辺則夫 「ソフトコンピューティングと時系列解析—ファジィ・ニューロによる予測入門」シーエーピー出版 2003 年 10 月

連絡先: 新田純也、〒532-0011 大阪市淀川区西中島 6-1-1 新大阪プライムタワー20 階、
所属先: アルカディア・システムズ株式会社、
E-mail: nitta@arc-mec.co.jp