

DGA 中三比值缺码研究初探

宋 斌¹, 刘志雄¹, 李恩文¹, 王国利²

(1. 武汉大学 电气工程学院, 湖北 武汉 430072;

2. 特高压工程技术(昆明、广州)国家工程实验室, 广东 广州 510080)

摘要: 三比值法的 011 编码没有给出对应的故障类型。在收集整理油中溶解气体分析(DGA)数据的基础上, 将 011 编码的数据与编码空间中相邻的 4 个编码数据进行对比分析。分析发现, 故障气体含量的对数值之间存在线性关系, 进而利用线性回归和假设检验的方法对线性关系进行了研究。研究表明, 甲烷、乙烷、乙烯的气体含量之间存在较明显的线性关系, 而氢气与烃类气体含量的线性关系略微偏弱。利用线性分析的结果, 并结合故障气体含量, 对 011 编码所反映的故障类型从定性的角度进行了初步探讨。

关键词: 油中溶解气体分析; 三比值法; 电力变压器; 故障诊断; 线性回归

中图分类号: TM 41

文献标识码: A

DOI: 10.16081/j.issn.1006-6047.2015.12.009

0 引言

电力变压器作为电力系统中关键设备之一, 其安全稳定的运行是保证正常输电的前提。对变压器进行状态监测, 及时发现并排除变压器的潜伏性故障, 防止突发事件的发生, 对电网运行具有重要意义。以分析油中溶解气体组份和含量为基础的油中溶解气体分析 DGA (Dissolved Gas Analysis), 是运用最为广泛的变压器状态监测和故障诊断方法之一^[1]。在 1997 年颁布执行的电力设备预试规程中, 已把 DGA 放到了首要的位置。众多的研究者在分析大量实验数据的基础上, 先后提出了多种基于 DGA 的变压器绝缘故障诊断方法, 包括罗杰斯四比值、特征气体法、IEC 三比值法、改良电协研法等。其中三比值法能及时发现变压器潜伏性故障隐患, 是电力变压器绝缘故障诊断最常用的方法。此外, 一些机器学习方法, 如灰色理论^[2]、神经网络^[3-4]、模糊数学^[5]、支持向量机^[6-7]、遗传算法^[8]、粗糙集^[9-10]等也被用于变压器 DGA 诊断。

我国 1987 年颁布的 GB7252—87《变压器油中溶解气体分析和判断导则》中, 三比值编码只有 9 个, 编码不完备。随着运行经验的积累和故障数据的丰富, 三比值判别法得到了改进和完善。结合 IEC60599, 我国在 2001 年对导则进行了修订(即 GB/T7252—2001), 新增了复合型故障类型和故障编码, 故障诊断效果有了很大改进和提高。但是该导则仍然存在缺码问题, 没有给出 011 编码及其对应的故障类型, 而实际应用中存在这样的编码数据, 会出现无法判断其故障类型的情况。由于难以收集到

足够的相关样本数据等各种原因, 目前国内外相关的研究非常少见。如文献[11]利用 B 样条理论改进的三比值故障诊断方法来处理缺码以及边界处误判的问题, 取得了一定的效果, 但对缺码时数据之间的关联情况并没有分析。本文结合从大量文献及实际应用中收集到的 DGA 数据, 应用线性回归分析方法, 对 011 编码所反映的故障类型进行了初步探究。

1 011 在编码空间的位置

三比值法采用 H_2 、 CH_4 、 C_2H_6 、 C_2H_4 、 C_2H_2 这 5 种气体含量所构成的 3 个比值来表征不同的故障。编码规则如表 1 所示^[1]。表中, $c(\cdot)$ 表示对应气体的含量, 后同。

表 1 三比值编码方法
Table 1 Coding of three-ratio method

比值范围	气体含量比值		
	$c(C_2H_2)/c(C_2H_4)$	$c(CH_4)/c(H_2)$	$c(C_2H_4)/c(C_2H_6)$
(0, 0.1)	0	1	0
[0.1, 1)	1	0	0
[1, 3)	1	2	1
[3, ∞)	2	2	2

将各个编码所代表的故障画在三维比值空间中, 如图 1 所示。在图 1 中, 相同的故障用同一种颜色标识。从图中可以直观看出所缺的编码 011 所处的位置。与 011 相邻的编码有 4 个, 即 010、012、001 和 111。这 4 个编码所代表的故障类型分别为局部放电、高温过热、低温过热和电弧放电。

2 线性回归分析

本文利用线性回归来分析 011 编码时 DGA 中各数据含量的关系以及对应的故障。一元线性回归方程模型为:

$$\begin{cases} y = \beta_0 + \beta_1 x + \varepsilon \\ \varepsilon \sim N(0, \delta^2) \end{cases} \quad (1)$$

收稿日期: 2014-12-16; 修回日期: 2015-09-09

基金项目: 特高压工程技术(昆明、广州)国家工程实验室开放基金资助项目(NEL201412)

Project supported by National Engineering Laboratory for UHV Engineering Technology(Kunming, Guangzhou)(NEL201412)

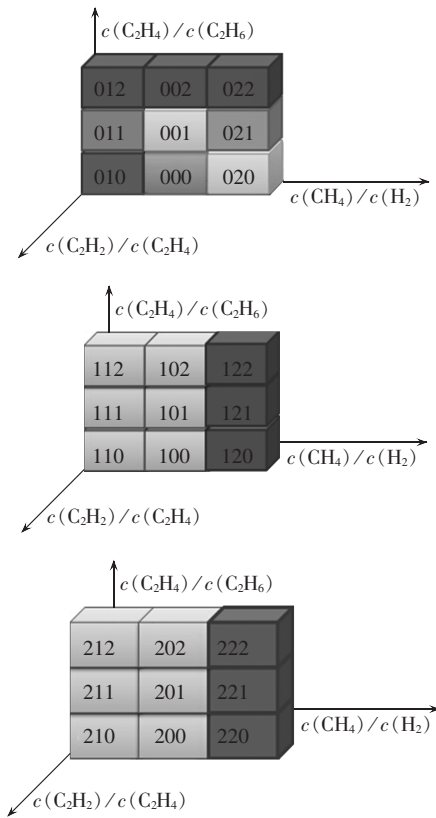


图 1 不同的编码在编码空间中的位置

Fig.1 Position of different codes in code space

其中, β_0, β_1, δ 是与 x 无关的未知参数, 可用最小二乘法来求得参数 β_0, β_1 。由克莱姆(Cramer)法则可得:

$$\begin{cases} \hat{\beta}_1 = \frac{l_{xy}}{l_{xx}} = \frac{\sum (x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y})}{\sum (x_i - \bar{x})^2} = \frac{\sum (x_i - \bar{x})y_i}{\sum (x_i - \bar{x})^2} \\ \hat{\beta}_0 = \bar{y} - \hat{\beta}_1 \bar{x} \end{cases} \quad (2)$$

相关系数 R 是回归直线与样本观测值拟合优度的相对指标。设 S_R 为回归平方和, S_T 为总偏差平方和, 其具体含义可参见文献[12]。比重 S_R/S_T 越大, 则回归效果越好。令:

$$R = \sqrt{\frac{S_R}{S_T}} = \frac{l_{xy}}{\sqrt{l_{xx} l_{yy}}} = \frac{\sum (x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y})}{\sqrt{\sum (x_i - \bar{x})^2 \sum (y_i - \bar{y})^2}} \quad (3)$$

由于 $0 \leq S_R \leq S_T, |R| \leq 1$, 通常用 R^2 作为刻画线性回归效果的参数。当 R^2 越接近 1 时, y 与 x 的线性相关性越强。

一元线性回归方程 $\hat{y} = \hat{\beta}_0 + \hat{\beta}_1 x$ 是否真正描述了变量 y 与 x 之间的统计规律, 还需对回归系数 β_1 是否为 0 进行显著性检验[16]。本文利用 t 检验法对回归系数进行检验, 显著性水平 α 取为 0.05。P 值(P-Value)表示当原假设为真时所得到的样本观察结果或更极端结果出现的概率。当 $P < \alpha$ 时, 回归效果显著, 回归方程有效。

3 不同编码数据的分析对比

笔者从已发表的文献中整理摘录了 4500 条油

色谱数据, 删除重复、无明确故障类型的数据后, 经过筛选后得到 011 编码数据共计 15 条, 其中局部放电故障数据 12 条、过热故障数据 2 条、低能放电故障数据 1 条, 如表 2 所示[13-16]。

表 2 011 编码数据及故障
Table 2 Data related to code 011 and corresponding fault types

$c(\text{H}_2)$	$c(\text{CH}_4)$	$c(\text{C}_2\text{H}_6)$	$c(\text{C}_2\text{H}_4)$	$c(\text{C}_2\text{H}_2)$	编码	故障类型
90.0	5.4	2.0	2.7	0	011	局部放电
89.3	1.8	0.2	0.7	0	011	局部放电
135.9	2.4	0.5	0.7	0	011	局部放电
157.8	3.2	0.6	0.7	0	011	局部放电
181.0	0.6	0.2	0.2	0	011	局部放电
256.0	23.8	4.6	7.0	0	011	局部放电
420.0	37.3	14.9	30.0	0.2	011	局部放电
585.0	32.8	11.4	13.0	0	011	局部放电
700.0	60.0	20.0	40.0	0	011	局部放电
1565.0	93.0	34.0	47.0	0	011	局部放电
980.0	73.0	58.0	120.0	0	011	局部放电
538.3	12.6	8.7	14.1	0.3	011	局部放电
1680.0	0	1.8	2.1	0	011	低能放电
3319.0	36.5	31.5	39.3	0	011	固体绝缘过热
565.0	53.0	34.0	47.0	0	011	低温过热

分析上述 011 编码的数据可发现, 这些数据中, H_2 含量占氢烃总量的 90% 以上, CH_4 含量占总烃的百分比大多超过 50%, 而 C_2H_2 含量很小, 几乎都为 0。当把上述数据按照某种气体(如 CH_4)从小到大的顺序排列之后, 其余气体也体现出明显的递增规律。气体之间含某种较强的相关关系。由于 H_2 的含量远大于其余气体, 其递增规律不明显。

因各条数据中气体含量差异较大, 为了能够在同一水平上对数据进行分析探讨, 对 DGA 数据进行取自然对数处理。由于 C_2H_2 含量几乎都为 0, 所以不再对 C_2H_2 进行分析, 下文主要探讨 $\text{CH}_4, \text{C}_2\text{H}_6, \text{C}_2\text{H}_4, \text{H}_2$ 这 4 种气体之间的关系。

对 $\text{CH}_4, \text{C}_2\text{H}_6, \text{C}_2\text{H}_4, \text{H}_2$ 的含量取自然对数后, 4 种气体的含量之间存线性关系, 以任何一种气体为参考, 当该气体增加时, 其余 3 种气体均以线性关系增加。即以任何一种气体的含量的对数值作为横坐标, 其余 3 种气体含量的对数值为纵坐标进行作图, 3 种气体呈现出线性分布关系。本文以 CH_4 含量的对数值为横坐标, 其余气体含量对数值作为纵坐标作图, 进行线性回归分析, 探讨气体含量之间的关系。线性关系具有传递性, 当以其余 3 种气体($\text{H}_2, \text{C}_2\text{H}_6, \text{C}_2\text{H}_4$)为参考时, 对本文的回归分析表达式进行数学变换, 即可近似得出相应的回归分析表达式。

对表 2 数据进行回归分析表明, $\ln(c(\text{C}_2\text{H}_4))$ 、 $\ln(c(\text{C}_2\text{H}_6))$ 与 $\ln(c(\text{CH}_4))$ 之间呈现数明显的线性关系, 如图 2 所示。

从线性回归分析结果可得:

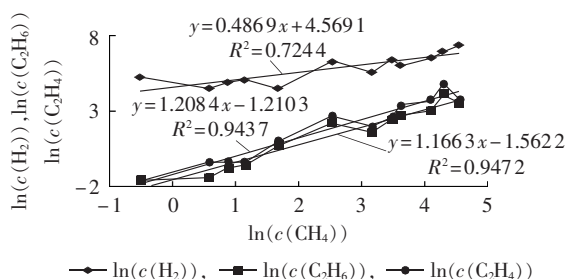


图 2 011 编码数据变化关系

Fig.2 Variation of data related to code 011

$$\ln(c(\text{C}_2\text{H}_4))=1.2084\ln(c(\text{CH}_4))-1.2103, R^2=0.9437, P=1.42 \times 10^{-7}$$

$$\ln(c(\text{C}_2\text{H}_6))=1.1663\ln(c(\text{CH}_4))-1.5622, R^2=0.9472, P=1.03 \times 10^{-7}$$

$$\ln(c(\text{H}_2))=0.4869\ln(c(\text{CH}_4))+4.5691, R^2=0.7244, P=4.46 \times 10^{-4}$$

上述 3 个回归方程中, P 值均远小于 0.05, 在显著水平 $\alpha=0.05$ 情况下, 上述回归方程有效, H_2 、 C_2H_6 、 C_2H_4 与 CH_4 的含量之间存在线性关系。 R^2 和 P 值均能反映变量之间的线性强弱关系, 在观测次数相同的情况下, P 值越小, R^2 越接近 1, 则 2 个变量的线性关系越强。011 编码所对应的 3 个回归方程中, $\ln(c(\text{H}_2))$ 对应的 R^2 相对较小, 为 0.7244, P 值为 4.46×10^{-4} , 相对较大, $\ln(c(\text{H}_2))$ 与 $\ln(c(\text{CH}_4))$ 之间的线性相关性相对较弱。而 $\ln(c(\text{C}_2\text{H}_4))$ 、 $\ln(c(\text{C}_2\text{H}_6))$ 的 R^2 都大于 0.94, P 值都很小, 与 $\ln(c(\text{CH}_4))$ 之间存在较强的线性关系。同时, 从图 2 中可以看出, 011 编码的数据, H_2 含量远大于 C_2H_4 和 C_2H_6 的气体含量。

对与 011 相邻的 4 个编码(001、111、010、012)所代表的 4 种故障, 每种故障类型选取了 10 条数据作为样本, 对其进行与 011 编码数据类似的分析, 分析结果如下。

001 编码代表低温过热故障, 其数据如表 3 所示, 线性回归分析如图 3 所示。

通过线性回归分析, 得到低温过热故障下, C_2H_4 等气体的含量与 CH_4 含量的变化关系:

$$\ln(c(\text{C}_2\text{H}_4))=0.9004\ln(c(\text{CH}_4))+0.1414, R^2=0.9714, P=1.84 \times 10^{-7}$$

表 3 低温过热故障数据

Table 3 Data of low-temperature overheat fault

$c(\text{H}_2)$	$c(\text{CH}_4)$	$c(\text{C}_2\text{H}_6)$	$c(\text{C}_2\text{H}_4)$	$c(\text{C}_2\text{H}_2)$	故障类型
11.90	12.40	5.90	13.60	1.03	低温过热
37.97	30.94	7.87	23.00	0	低温过热
46.00	42.00	9.70	27.60	1.03	低温过热
60.00	60.00	16.00	40.00	0.30	低温过热
87.20	73.18	27.14	56.88	0	低温过热
100.00	95.00	24.00	70.00	0	低温过热
110.40	112.00	32.50	80.80	0	低温过热
120.00	120.00	33.00	84.00	0.55	低温过热
160.00	130.00	33.00	96.00	0	低温过热
181.00	162.00	70.00	132.00	0	低温过热

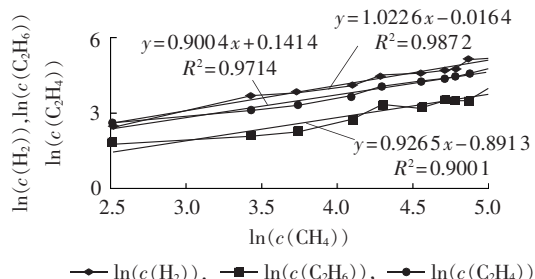


图 3 低温过热数据线性回归分析结果

Fig.3 Results of linear regression analysis for low-temperature overheat data

$$\ln(c(\text{C}_2\text{H}_6))=0.9265\ln(c(\text{CH}_4))-0.8913, R^2=0.9001, P=2.84 \times 10^{-5}$$

$$\ln(c(\text{H}_2))=1.0226\ln(c(\text{CH}_4))-0.0164, R^2=0.9872, P=7.4 \times 10^{-9}$$

上述 3 个公式中, P 值远小于显著性水平 0.05, R^2 均大于 0.9, 说明在低温过热故障情况下, H_2 、 CH_4 、 C_2H_4 、 C_2H_6 这 4 种气体的含量之间存在着很强的线性关系。

111 编码代表电弧放电故障, 故障数据和分析图如表 4 和图 4 所示。

表 4 高能放电故障数据

Table 4 Data of arc discharge fault

$c(\text{H}_2)$	$c(\text{CH}_4)$	$c(\text{C}_2\text{H}_6)$	$c(\text{C}_2\text{H}_4)$	$c(\text{C}_2\text{H}_2)$	故障类型
23.00	5.80	1.00	3.10	3.62	电弧放电
38.60	7.30	1.80	11.90	15.60	高能放电
17.01	13.76	3.07	39.57	26.59	高能放电
150.00	27.00	3.60	63.00	90.00	高能放电
138.70	50.80	7.70	55.20	96.00	高能放电
157.00	91.00	16.00	145.00	73.00	电弧放电
1027.00	185.00	17.00	271.00	399.00	高能放电
1590.00	400.00	46.00	1015.00	2292.00	高能放电
1350.30	602.76	46.10	705.61	896.69	高能放电
20271.00	1660.00	133.00	2782.00	1824.00	高能放电

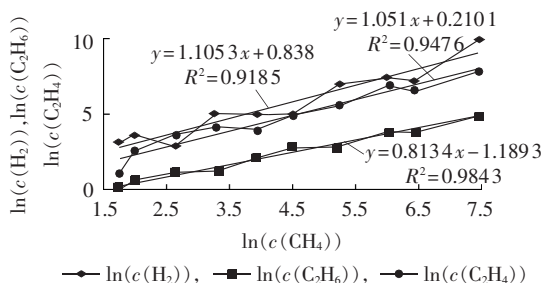


图 4 高能放电数据线性回归分析结果

Fig.4 Results of linear regression analysis for arc discharge fault

对气体含量变化进行回归分析, 得:

$$\ln(c(\text{C}_2\text{H}_4))=1.051\ln(c(\text{CH}_4))+0.2101, R^2=0.9476, P=2.11 \times 10^{-6}$$

$$\ln(c(\text{C}_2\text{H}_6))=0.8134\ln(c(\text{CH}_4))-1.1893, R^2=0.9843, P=1.67 \times 10^{-8}$$

$$\ln(c(\text{H}_2)) = 1.1053 \ln(c(\text{CH}_4)) + 0.838, R^2 = 0.9185, P = 1.25 \times 10^{-5}$$

在 高 能 放 电 故 障 情 况 下, H_2 、 C_2H_4 、 C_2H_6 的 含 量 在 取 自 然 对 数 后, 与 CH_4 的 含 量 之 间 也 存 在 严 格 的 线 性 关 系。在 电 弧 放 电 故 障 下, 通 常 会 有 大 量 的 C_2H_2 生 成, 但 011 编 码 的 数 据 中, C_2H_2 含 量 几 乎 为 0, 所 以 011 编 码 的 数 据 为 电 弧 放 电 的 可 能 性 很 小。

编 码 012 代 表 高 温 过 热 故 障, 原 始 数 据 及 回 归 分 析 曲 线 如 表 5 和 图 5 所 示。

表 5 高 温 过 热 故 障 数 据

Table 5 Data of high-temperature overheat fault

$c(\text{H}_2)$	$c(\text{CH}_4)$	$c(\text{C}_2\text{H}_6)$	$c(\text{C}_2\text{H}_4)$	$c(\text{C}_2\text{H}_2)$	故障类型
11.30	24.60	12.70	59.9	2.80	高温过热
96.10	106.20	36.40	189.5	1.82	高温过热
98.00	123.00	33.00	296.0	16.00	高温过热
37.00	149.60	39.10	262.7	0.60	高温过热
99.00	173.90	57.40	377.1	1.70	高温过热
46.00	180.70	49.00	325.6	0.70	高温过热
105.00	241.90	85.90	511.1	2.10	高温过热
164.00	244.00	103.00	497.0	8.30	高温过热
172.90	334.10	172.90	812.5	37.70	高温过热
414.21	510.13	288.23	1432.4	8.45	高温过热

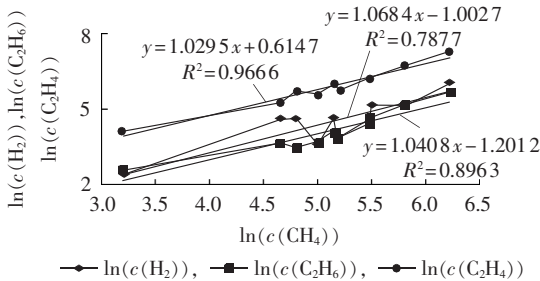


图 5 高 温 过 热 数 据 线 性 回 归 分 析 结 果

Fig.5 Results of linear regression analysis for high-temperature overheat

对 表 5 中 数 据 线 性 回 归 分 析 结 果 如 下:

$$\ln(c(\text{C}_2\text{H}_4)) = 1.0295 \ln(c(\text{CH}_4)) + 0.6147, R^2 = 0.9666, P = 3.46 \times 10^{-7}$$

$$\ln(c(\text{C}_2\text{H}_6)) = 1.0408 \ln(c(\text{CH}_4)) - 1.2012, R^2 = 0.8963, P = 3.31 \times 10^{-5}$$

$$\ln(c(\text{H}_2)) = 1.0684 \ln(c(\text{CH}_4)) - 1.0027, R^2 = 0.7877, P = 6.10 \times 10^{-4}$$

其 中, $\ln(c(\text{H}_2))$ 与 $\ln(c(\text{CH}_4))$ 的 线 性 度 相 对 较 低; $\ln(c(\text{C}_2\text{H}_4))$ 、 $\ln(c(\text{C}_2\text{H}_6))$ 与 $\ln(c(\text{CH}_4))$ 之 间 具 有 较 强 的 线 性 关 系。同 时 分 析 结 果 表 明, 在 高 温 过 热 故 障 下, C_2H_4 是 含 量 最 大 的 特 征 气 体, 其 含 量 远 大 于 其 余 气 体。

010 编 码 代 表 局 部 放 电 故 障, 数 据 回 归 分 析 如 表 6 和 图 6 所 示。

进 行 线 性 回 归 分 析 结 果 如 下:

$$\ln(c(\text{C}_2\text{H}_4)) = 1.2165 \ln(c(\text{CH}_4)) - 2.0857, R^2 = 0.9432, P = 2.91 \times 10^{-6}$$

表 6 局 部 放 电 故 障 数 据

Table 6 Data of partial discharge fault

$c(\text{H}_2)$	$c(\text{CH}_4)$	$c(\text{C}_2\text{H}_6)$	$c(\text{C}_2\text{H}_4)$	$c(\text{C}_2\text{H}_2)$	故障类型
154.99	1.81	0.46	0.14	0	局部放电
162.39	3.13	1.42	0.87	0	局部放电
87.30	6.50	5.20	1.10	0	局部放电
83.71	8.07	5.18	3.04	0	局部放电
225.50	17.60	8.40	3.00	0	局部放电
485.00	35.00	29.00	6.00	0	局部放电
650.00	53.00	34.00	20.00	0	局部放电
832.00	69.00	58.30	14.00	1.1	局部放电
1256.00	80.00	62.00	38.00	0	局部放电
1950.00	159.00	102.00	60.00	0	局部放电

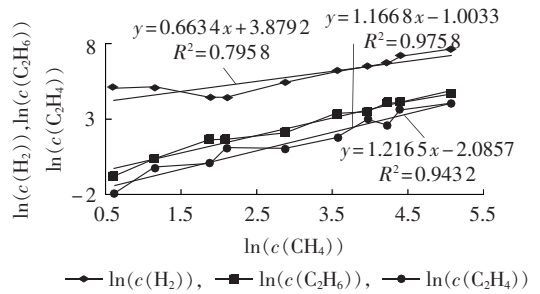


图 6 局 部 放 电 数 据 线 性 回 归 分 析 结 果

Fig.6 Results of linear regression analysis for partial discharge fault

$$\ln(c(\text{C}_2\text{H}_6)) = 1.1668 \ln(c(\text{CH}_4)) - 1.0033, R^2 = 0.9758, P = 9.42 \times 10^{-8}$$

$$\ln(c(\text{H}_2)) = 0.6634 \ln(c(\text{CH}_4)) + 3.8792, R^2 = 0.7958, P = 5.20 \times 10^{-4}$$

由 上 面 分 析 可 知, 在 局 部 放 电 故 障 下, 取 自 然 对 数 后, $\ln(c(\text{C}_2\text{H}_4))$ 、 $\ln(c(\text{C}_2\text{H}_6))$ 与 $\ln(c(\text{CH}_4))$ 之 间 存 在 较 强 的 线 性 关 系。同 时 H_2 的 含 量 远 大 于 其 余 气 体。收 集 到 的 011 编 码 的 数 据 也 具 有 这 一 特 征。

通 过 对 比 上 述 几 种 不 同 的 故 障 可 以 发 现, 在 过 热 故 障 放 电 故 障 下, CH_4 、 C_2H_6 、 C_2H_4 的 气 体 含 量 在 取 自 然 对 数 后, 都 具 有 较 强 的 线 性 关 系。而 H_2 与 上 述 烃 类 小 分 子 物 质 之 间 的 相 关 性 较 弱, 可 能 原 因 是 变 压 器 绝 缘 油 中 H_2 的 来 源 途 径 较 多, 并 不 只 是 在 油 分 解 时 才 产 生, H_2 的 多 途 径 来 源 (如 油 中 水 分 分 解) 导 致 单 纯 的 H_2 增 长 而 几 乎 不 产 生 烃 类 物 质, 使 得 H_2 含 量 与 其 余 烃 类 气 体 含 量 之 间 的 关 联 性 遭 到 破 坏。而 CH_4 、 C_2H_4 、 C_2H_2 都 只 由 绝 缘 材 料 分 解 而 来, 相 关 联 性 较 大。

综 上 所 述, 在 编 码 空 间 中, 与 011 编 码 相 邻 的 4 个 编 码 所 代 表 的 故 障 中, 电 弧 放 电 故 障 含 有 大 量 的 C_2H_2 , 高 温 过 热 故 障 含 有 大 量 的 C_2H_4 , 局 部 放 电 故 障 含 有 大 量 的 H_2 , 低 温 过 热 故 障 的 H_2 与 C_2H_4 含 量 相 当。编 码 为 011 的 数 据, 其 故 障 类 型 只 可 能 是 与 其 相 邻 的 4 个 编 码 所 代 表 的 故 障 中 的 一 种。对 气 体 含 量 取 对 数 进 行 回 归 分 析 后, 结 果 表 明, 011 编 码 的 数 据 线 性 图 像 与 局 部 放 电 数 据 最 为 相 似, 都 是 H_2 是 含 量

最大的特征气体,其含量远大于其余烃类气体。在每种故障下,CH₄、C₂H₄和C₂H₂的含量之间都具有较强的线性关系,并且不同故障下,拟合直线的斜率不同,011编码的数据斜率与局部放电最为接近,如表7所示。

表7 不同故障状态下,乙烯、乙烷含量和甲烷含量关系的拟合直线斜率

Table 7 Slope of fitted relation line between ethylene and methane and between ethane and methane for different fault types

气体	斜率				
	011	低温过热	高能放电	高温过热	局部放电
C ₂ H ₄	1.208	0.900	1.051	1.030	1.217
C ₂ H ₆	1.166	0.927	0.813	1.041	1.167

4 结论

研究表明,在对故障气体含量取对数之后,故障气体之间存在线性关系,且不同故障下,气体之间的相对变化率不同。011编码数据所反映的故障可能是编码空间中与其相邻的4个编码故障(即局部放电、高温过热、低温过热和电弧放电)中的一种,其与局部放电故障数据最为接近。遇到编码为011的数据时,可结合故障气体含量进行判别分析。若故障气体中含有大量H₂,H₂占氢烃的比重超过75%,则可能是局部放电故障;若故障气体中含有较多C₂H₄,C₂H₄占烃类气体的比重超过60%,则可能是高温过热故障;若H₂和C₂H₄含量都不是很高,占氢烃和总烃的比重均低于40%,且彼此接近,则可能是低温过热故障;若无上述特征,且故障气体中含有C₂H₂,则可能是电弧放电故障。

参考文献:

- [1] 中国电力科学研究院. 变压器油中溶解气体分析和判断导则: GB/T7252—2001[S]. 北京:中国标准出版社,2001.
- [2] 宋斌,于萍,罗运柏,等. 基于灰关联熵的充油变压器故障诊断方法[J]. 电力系统自动化,2005,29(18):76-79.
SONG Bin,YU Ping,LUO Yunbai,et al. Fault diagnosis for power transformer based on grey relation entropy[J]. Automation of Electric Power Systems,2005,29(18):76-79.
- [3] 张东波,徐瑜,王耀南. 主动差异学习神经网络集成方法在变压器DGA故障诊断中的应用[J]. 中国电机工程学报,2010,30(20):64-70.
ZHANG Dongbo,XU Yu,WANG Yaonan. Neural network ensemble method and its application in DGA fault diagnosis of power transformer on the basis of active diverse learning[J]. Proceedings of the CSEE,2010,30(20):64-70.
- [4] 付强,陈特放,朱佼佼. 采用自组织RBF网络算法的变压器故障诊断[J]. 高电压技术,2012,38(6):1368-1375.
FU Qiang,CHEN Tefang,ZHU Jiaojiao. Transformer fault diagnosis using self-adaptive RBF neural network algorithm[J]. High Voltage Engineering,2012,38(6):1368-1375.
- [5] 邹杰慧. 基于新型编码隶属函数的变压器故障模糊诊断法[J]. 电力自动化设备,2010,30(7):88-91.
ZOU Jiehui. Fuzzy fault diagnosis of power transformer based on new coding membership function[J]. Electric Power Automation Equipment,2010,30(7):88-91.
- [6] 尹金良,刘玲玲. 代价敏感相关向量机的研究及其在变压器故障诊断中的应用[J]. 电力自动化设备,2014,34(5):111-115.
YIN Jinliang,LIU Lingling. CS-RVM and its application in fault diagnosis of power transformers[J]. Electric Power Automation Equipment,2014,34(5):111-115.
- [7] 梁永亮,李可军,牛林,等. 一种优化特征选择-快速相关向量机变压器故障诊断方法[J]. 电网技术,2013,37(11):3262-3267.
LIANG Yongliang,LI Kejun,NIU Lin,et al. A transformer diagnosis method based on optimized feature selection methods and fast relevance vector machine[J]. Power System Technology,2013,37(11):3262-3267.
- [8] 张凯,黄华平,杨海涛,等. 利用改进遗传算法与LS-SVM进行变压器故障诊断[J]. 电网技术,2010,34(2):164-168.
ZHANG Kai,HUANG Huaping,YANG Haitao,et al. A transformer fault diagnosis method integrating improved genetic algorithm with least square support vector machine[J]. Power System Technology,2010,34(2):164-168.
- [9] DONG L,XIAO D,LIANG Y,et al. Rough set and fuzzy wavelet neural network integrated with least square weighted fusion algorithm based fault diagnosis research for power transformers[J]. Electric Power Systems Research,2008,78(1):129-136.
- [10] 陈小青,刘觉民,黄英伟. 采用改进人工鱼群优化粗糙集算法的变压器故障诊断[J]. 高电压技术,2012,38(6):1403-1409.
CHEN Xiaoqing,LIU Juemin,HUANG Yingwei. Transformer fault diagnosis using improved artificial fish swarm with rough set algorithm[J]. High Voltage Engineering,2012,38(6):1403-1409.
- [11] 张卫华,苑津莎,张铁峰,等. 应用B样条理论改进的变压器三比值故障诊断方法[J]. 中国电机工程学报,2014,34(24):4129-4135.
ZHANG Weihua,YUAN Jinsha,ZHANG Tiefeng,et al. An improved three-ratio method for transformer fault diagnosis using B-spline theory[J]. Proceedings of the CSEE,2014,34(24):4129-4135.
- [12] 邵淑彩. 应用数理统计[M]. 2版. 武汉:武汉大学出版社,2005.
- [13] 李霖,刘飞霞,杨章俊,等. 变压器内部故障诊断研究[J]. 电气开关,2013(5):44-47.
LI Lin,LIU Feixia,YANG Zhangjun,et al. Study on fault diagnosis of transformers[J]. Electric Switchgear,2013(5):44-47.
- [14] 贾辉. 油浸电力变压器受潮故障分析与处理[J]. 中国电力,2009,42(5):85-87.
JIA Hui. Analysis and treatment of moistened fault in oil-immersed power transformers[J]. Electric Power,2009,42(5):85-87.
- [15] 林永平. 色谱分析在变压器故障诊断中的应用探讨[J]. 变压器,2008,45(8):58-60.
LIN Yongping. Discussion and application of chromatographic analysis to transformer fault diagnosis[J]. Transformer,2008,45(8):58-60.
- [16] 杜阳. 用“无编码比值法”分析和判断变压器故障性质[J]. 变压器,1999,36(3):32-36.
DU Yang. Analysis and judgement for transformer fault by

using "non-code ratio method" [J]. Transformer, 1999, 36 (3): 32-36.

作者简介:

宋 斌(1970—),男,湖北天门人,副教授,主要从事电气设备状态检修等方面研究工作(**E-mail**:Songbin72@163.com);

刘志雄(1973—),男,湖北武汉人,讲师,博士,通信作者,主要从事电力系统通信与控制以及电力系统信息化相关



宋 斌

研究工作(**E-mail**:zxliu@whu.edu.cn);

李恩文(1990—),男,四川西昌人,硕士研究生,研究方向为电力变压器故障诊断与状态检修;

王国利(1975—),男,山东德州人,高级工程师,博士,主要从事特高压试验基地的建设和高电压试验研究工作技术的试验研究工作。

Preliminary study of undefined three-ratio code in DGA

SONG Bin¹, LIU Zhixiong¹, LI Enwen¹, WANG Guoli²

(1. School of Electrical Engineering, Wuhan University, Wuhan 430072, China;

2. National Engineering Laboratory for UHV Engineering Technology (Kunming, Guangzhou), Guangzhou 510080, China)

Abstract: The fault type of three-ratio code 011 is not defined, aiming at which, the DGA (Dissolved Gas Analysis) data are collected and sorted out, and the data related to code 011 and its four adjacent codes in code space are analyzed and compared. Results show the relationship between the logarithms of fault gas contents is linear. Further research on the relationship by the linear regression and hypothesis test shows that, the linear relationship among methane, ethane and ethylene is obvious while that between hydrogen and hydrocarbon is less obvious. The fault type of code 011 is preliminarily and qualitatively discussed based on the content of fault gases and the results of linearity analysis.

Key words: DGA; three-ratio method; power transformers; fault diagnosis; linear regression

(上接第 59 页 continued from page 59)

[J]. IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, 1981, pas-100(2):594-607.

作者简介:

刘连光(1954—),男,吉林汪清人,教授,博士研究生导师,研究方向为电网安全运行与突变控制、电力系统规划;

秦晓培(1990—),女,河北邯郸人,硕士研究生,研究方



刘连光

向为电网安全运行与突变控制(**E-mail**: happyqin2012@126.com);

葛小宁(1983—),女,河北唐山人,博士研究生,研究方向为电网安全运行与突变控制、电力系统规划。

GIC reactive power loss calculation based on $U-I$ curve for single-phase autotransformer

LIU Lianguang¹, QIN Xiaopei^{1,2}, GE Xiaoning¹

(1. State Key Laboratory for Alternate Electrical Power System with Renewable Energy Sources, North China Electric Power University, Beijing 102206, China; 2. State Grid Hebei Shexian Power Supply Company, Shexian 056400, China)

Abstract: Since it is very hard to accurately calculate the reactive power turbulence caused by the GIC (Geomagnetically Induced Current) for the whole power grid, a method is proposed to calculate the GIC reactive power loss of single-phase autotransformer widely used in UHV and EHV power grid, which builds the analytic model of $\psi-i$ curve based on its $U-I$ curve and nameplate parameters to calculate the reactive power increment caused by the GIC. The proposed algorithm is suitable for the engineering calculation to assess the GIC influence and its effectiveness is validated by case study.

Key words: $U-I$ curve; $\psi-i$ curve; single-phase autotransformer; geomagnetically induced current; reactive power loss