

灰色关联分析在变压器故障识别中的应用探讨

胡非, 干磊

(黄石供电公司, 湖北 黄石 435000)

摘要: 变压器的正常工作对于保障电力系统安全稳定运行起到了举足轻重的作用, 因此, 对其进行定期或不定期的故障诊断显得尤为必要。在常规油中溶解气体分析法(DGA)的变压器故障诊断方法基础上, 将传统灰色关联分析法和 B 型灰色关联分析法分别应用于变压器故障识别中, 并结合实例对两种方法的适用性进行了探讨。研究结果表明, B 型灰色关联分析较传统灰色关联分析法, 更能够有效地对变压器故障进行识别, 证明了该方法在变压器故障识别领域良好的适用性。最后, 对两种灰色关联分析法在变压器识别中的所遇到的问题进行了分析, 认为应对 DGA 所测得的各气体含量占总气体含量权重等方面进行进一步的研究。

关键词: 变压器; 故障识别; 传统灰色关联分析; B 型灰色关联分析

Abstract: The normal operation of transformer plays a key role on the safe and stable operation of the whole power system, so it is very necessary to carry out the regular or irregular fault diagnosis for the transformer. Based on the transformer fault diagnosis method of the conventional oil dissolved gas analysis approach (DGA), the traditional grey relational analysis and B-type grey relational analysis are applied to the transformer fault identification, and then the applicability of two methods is discussed according to an instance. The results show that comparing with the traditional grey relational analysis, B-type grey relational analysis is more effective on the identification of transformer fault, which verifies that B-type grey relational analysis method has a good applicability in transformer fault identification. Finally, the problems encountered in transformer fault identification by these two grey relation analysis methods are analyzed, and it suggests that further research will be needed in the weight of each gas content in total gas content which is measured by DGA method.

Key words: transformer; fault identification; traditional grey relational analysis; B-type grey relational analysis

中图分类号: TM407 文献标志码: A 文章编号: 1003-6954(2016)06-0073-05

DOI:10.16527/j.cnki.cn51-1315/tm.2016.06.017

0 引言

随着中国经济的快速增长, 电力需求也越来越大, 变压器作为电力系统中的重要设备, 在电力传输过程中起着非常重要的作用, 其能否正常运转直接影响到整个电力系统的安全运行。因此, 对变压器进行定期或不定期的故障诊断与识别显得尤为重要。目前油中溶解气体分析(dissolved gas analysis, DGA)技术在变压器故障诊断领域应用得最为广泛^[1-3]。这主要得益于其无破坏性、价廉高效的优点, 但该技术存在易受人为因素影响, 而且诊断复杂、时间较长等缺点, 在应用中也受到了许多限制。考虑到造成变压器故障的因素众多, 而且各种因素都存在不确定性和模糊性, 因此, 近年来国内外许多学者将模糊数学^[4]、灰色理论^[5-6]、遗传算法^[7]、人工神经网络^[8]等人工智能算法应用在变压器故障

识别中, 以寻求通过模糊信息对变压器的故障进行识别, 这些方法目前都得到了一定的应用, 并且取得了许多应用成果。

考虑到变压器故障系统“部分信息已知, 部分信息未知”的灰色特征, 将灰色关联分析引入到变压器故障识别中, 主要对传统灰色关联分析法和 B 型灰色关联分析法在变压器故障识别中的适用性进行探讨。以 DGA 检测所获得的气体组成含量为特征量, 在对特征数据的无量纲化处理的基础上, 分别通过对传统灰色关联度和 B 型灰色关联度的计算来对变压器故障进行识别。

1 两种灰色关联分析的基本原理

1.1 传统灰色关联分析法

灰色关联分析的主要用途在于通过对不完整的信息进行分析, 找出其内在的关联程度, 从而可以对

问题的发展趋势做出合理的推断与预测。灰色关联分析的基本思想是通过对数据序列进行曲线分析，通过比较其曲线几何形状的接近程度来判读各序列的关联程度^[9]。传统的灰色关联分析是通过比较子序列与母序列的位移差 $|X_0(k) - X_i(k)|$ 来反映两者发展的相近性；再通过位移差来计算子序列在不同时刻与母序列的关联系数；最后再将各个时刻的关联系数集中为一个值，作为子序列与母序列间关联程度的数量表示，也即关联度。具体如下：

设母因素序列为

$$X_0(k) = \{X_0(1), X_0(2), \dots, X_0(n)\} \quad (1)$$

子因素序列为

$$X_i(k) = \{X_i(1), X_i(2), \dots, X_i(n)\}, i = 1, 2, 3, \dots \quad (2)$$

式中： k 表示在不同时刻子因素对母因素的影响值； i 表示子因素（影响因素）的个数。

第 i 个子序列与母序列在第 k 时刻的灰色关联系数为

$$\xi_{0i}(k) = \frac{\min_k |X_0(k) - X_i(k)| + \rho \max_k |X_0(k) - X_i(k)|}{|X_0(k) - X_i(k)| + \rho \max_k |X_0(k) - X_i(k)|} \quad (3)$$

式中 ρ 为分辨系数，其取值能反映对 $\max_k |X_0(k) - X_i(k)|$ 的重视程度以及系统中各因子对关联系数的影响程度。 ρ 的取值区间为 $0.1 \sim 1$ ，一般在变压器故障识别中通常取 0.5 。

在计算出关联系数的基础上，通常通过均值法来计算子序列与母序列的关联度为

$$r(i) = \frac{1}{N} \sum_{k=1}^N \xi_{0i}(k) \quad (4)$$

1.2 B 型灰色关联分析法

在传统灰色关联分析中，主要是对相近性物理特征的位移差进行分析，在实际应用中往往会产生许多偏差，并不能较为准确地反映子序列与母序列的关联度。因此，在描述位移差的基础上，还应对相似性物理特征的速度差和加速度差进行描述，从而能够更加科学全面地反映子序列与母序列的关联度，这就是 B 型灰色关联分析的基础思想^[10]。具体如下：

定义位移差为

$$d_{0i}^{(0)}(k) = \sum_{k=1}^n |X_0(k) - X_i(k)| \quad (5)$$

定义速度差为

$$d_{0i}^{(1)}(k) = \sum_{k=1}^{n-1} |X_0'(k) - X_i'(k)| = \sum_{k=1}^{n-1} [X_0(k+1) - X_i(k+1)] - [X_0(k) - X_i(k)] \quad (6)$$

定义加速度差为

$$d_{0i}^{(2)}(k) = \sum_{k=2}^{n-1} |X_0''(k) - X_i''(k)| = \frac{1}{2} \sum_{k=2}^{n-1} [|X_0(k+1) - X_i(k+1)] - 2[X_0(k) - X_i(k)] + [X_0(k-1) - X_i(k-1)] \quad (7)$$

则 B 型灰色关联度的计算公式为

$$\xi_{0i}(0, k) = \frac{1}{1 + \frac{1}{n} d_{0i}^{(0)}(k) + \frac{1}{n-1} d_{0i}^{(1)}(k) + \frac{1}{n-2} d_{0i}^{(2)}(k)} \quad (8)$$

在计算出各个子序列的关联度后，对关联度的大小进行排序，所得到的序列称为灰色关联序列。数值越大，则关联度越大，并且说明该子序列与母序列的关系最为密切，对母序列的影响也最大；反之，数值越小，则关联度越小，说明该子序列与母序列的关系最为疏远，对母序列的影响也最小。

另外，还需注意的是在关联度计算之前，考虑到系统中各因素物理意义的不同，数据的量纲不尽相同，因此需要对原始数据进行无量纲化处理。一般在灰色关联分析中，通常要对原始序列进行初值化或均值化处理。

2 变压器标准故障模式向量的建立

在应用灰色关联分析对变压器故障进行识别之前，需要建立变压器标准故障模式向量。通常是以 DGA 技术所检测到的油中各种特征气体，比如 H_2 、 CH_4 、 C_2H_6 、 C_2H_4 、 C_2H_2 等的含量作为识别变压器故障的依据，在对大量变压器故障原因数据的采集和分析的基础上，最终选择 9 种典型的故障类型作为标准故障模式^[11]，再根据各种故障类型下 5 种气体的含量信息建立标准故障模式向量，如表 1 所示（其中气体组分含量的单位为 $\mu L/L$ ）。

为保持各种特征气体组分体积分数之间的同一性，保证数据序列能够进行相互比较分析，在运用两种灰色关联分析法对变压器故障进行识别时，应对典型故障参考数据进行归一化处理。这里采取均值化的归一化处理方法，具体是将每个故障下某特定气体的含量除以该故障下各种气体含量之和，即

$$\overline{X_i}(k) = \frac{X_i(k)}{X_i} \quad (9)$$

式中 $\overline{X_i} = \sum_{i=1}^5 X_i(k)$ $k = 1, 2, \dots, 5; i = 1, 2, \dots, 9$ 。

表 1 变压器典型故障参考参数

故障类型	序列编号	气体组分				
		H ₂	CH ₄	C ₂ H ₆	C ₂ H ₄	C ₂ H ₂
低温过热	M ₁	16.00	38.40	28.00	70.00	0
中温过热	M ₂	27.50	48.20	46.00	18.40	0
高温过热	M ₃	12.95	24.60	60.60	12.90	2.80
接地故障	M ₄	11.20	30.80	11.60	56.20	1.40
开关故障	M ₅	13.60	21.60	10.80	58.10	9.50
局部放电	M ₆	195.9	14.50	2.40	11.60	0
低能放电	M ₇	61.50	24.60	5.60	1.33	20.50
高能放电	M ₈	75.50	30.20	30.30	2.33	18.20
正常运行	M ₉	46.10	21.50	15.80	61.50	1.20

表 2 变压器典型故障归一化参考参数

故障类型	序列编号	气体组分				
		H ₂	CH ₄	C ₂ H ₆	C ₂ H ₄	C ₂ H ₂
低温过热	M ₁	0.105	0.252	0.184	0.459	0
中温过热	M ₂	0.196	0.344	0.328	0.131	0
高温过热	M ₃	0.114	0.216	0.532	0.113	0.025
接地故障	M ₄	0.101	0.277	0.104	0.505	0.013
开关故障	M ₅	0.120	0.190	0.095	0.511	0.084
局部放电	M ₆	0.873	0.065	0.011	0.052	0
低能放电	M ₇	0.542	0.217	0.049	0.012	0.181
高能放电	M ₈	0.482	0.193	0.194	0.015	0.116
正常运行	M ₉	0.316	0.147	0.108	0.421	0.008

表 3 实例 1 中两种灰色关联度比较表

故障类型	低温过热	中温过热	高温过热	接地故障	开关故障	局部放电	低能放电	高能放电	正常运行
传统灰色关联度	0.701 7	0.656 5	0.675 7	0.762 2	0.807 1	0.686 3	0.692 3	0.707 3	0.732 5
B 型灰色关联度	0.934 3	0.832 9	0.764 5	0.943 6	0.956 1	0.792 1	0.824 7	0.796 4	0.928 4

按式 (9) 进行归一化处理所得的数据序列 $X_i(k) = \{X_i(1) X_i(2) X_i(3) X_i(4) X_i(5)\}$ 称为均值化序列。经归一化处理后的标准故障模式向量见表 2。

3 灰色关联度故障诊断的应用

3.1 实例 1

为了比较两种灰色关联分析方法在变压器故障识别中的优劣性,选取某 220 kV 变电站 1 号主变压器的 DGA 检测所得到的油中气体组成含量(单位为 $\mu\text{L/L}$) H₂ 为 160、CH₄ 为 130、C₂H₆ 为 14.5、C₂H₄ 为 230、C₂H₂ 为 17.9。根据传统灰色关联分析的步骤,首先根据式 (9) 进行归一化处理,再根据式 (3) 可得到该气体组成向量与标准故障模式向量的灰色关联系数矩阵,最后根据式 (4) 可得到该变压器气体组成向量与各标准故障模式向量的灰色关联度,如表 3 所示。同样,根据 B 型灰色关联分析的步骤,在对数据进行归一化处理的基础上,根据式

(5)、式(6)、式(7)可以分别得到位移差、速度差以及加速度差,最后根据式(8)可以计算出该变压器气体组成向量与各标准故障模式向量的 B 型灰色关联度,如表 3 所示。

由表 3 可以看出,无论是通过 B 型灰色关联度分析还是传统灰色关联度分析,都可得出该变压器的气体组成向量与开关故障模式向量的关联度最大,初步判断该变压器故障是与开关故障有关。经变压器生产单位对该变压器进行故障检修发现,该变压器确实发生了开关故障,说明这两种方法均能对变压器的故障进行识别。但是,比较两者计算出的灰色关联度可以发现,与开关故障的关联度通过 B 型灰色关联度计算的为 0.956 1,而传统方法计算出的仅为 0.807 1,虽然后者也是该方法计算出的所有关联度中的最大值,但是与 B 型关联度的数值相比却小很多。根据关联度的意义可知,计算结果越接近于 1 表明相关性越高。因此,可以看出 B 型灰色关联度的计算精度高于传统灰色关联度,该方法能

表 4 实例 2 中两种灰色关联度比较表

故障类型	低温过热	中温过热	高温过热	接地故障	开关故障	局部放电	低能放电	高能放电	正常运行
传统灰色关联度	0.689 0	0.604 4	0.657 4	0.690 9	0.688 4	0.638 2	0.673 4	0.685 8	0.670 4
B 型灰色关联度	0.931 4	0.845 7	0.766 1	0.935 3	0.918 1	0.768 1	0.798 3	0.775 3	0.891 4

够更好地适用于变压器故障识别中。

3.2 实例 2

为了进一步对两种灰色关联分析方法的适用性进行研究,选取另一 220 kV 变电站 2 号主变压器的 DGA 数据进行分析,各种气体的含量(单位为 $\mu\text{L}/\text{L}$) H_2 为 230、 CH_4 为 850、 C_2H_6 为 272、 C_2H_4 为 816、 C_2H_2 为 2.3。同样,根据传统灰色关联分析步骤和 B 型灰色关联分析的步骤可以分别计算出两种方法下的关联度,具体结果如表 4 所示。

由表 4 可以看出,通过两种方法计算出的该变压器的气体组成向量均与接地故障模式向量的关联度最大,可以初步判断该变压器故障与接地故障有关。经相关检修人员检查发现,该变压器确实发生了接地故障。这也证明了灰色关联分析在变压器故障识别中的适用性。同样经分析可发现,B 型灰色关联度比传统灰色关联度的数值普遍偏大,B 型灰色关联度更接近于 1,这也说明采用 B 型灰色关联分析法更为准确,更能反映变压器的实际故障类型。这主要是因为 B 型灰色关联分析不仅考虑了变压器实际气体组成向量与标准故障模式向量之间的相近性,还考虑了两者之间的相似性,使计算的关联度更能较为实际地反映两者之间的关系,使预测结果更接近实际情况。综合来说,B 型灰色关联分析法在变压器故障识别中要优于传统灰色关联分析法。

3.3 实例中关联度变化趋势分析

将上述两个实例中所计算出的 B 型灰色关联度和传统灰色关联度分别以图 1、图 2 所示的直方分布图表示出来。由图 1 可以看出,两种灰色关联度均是在 M5 时达到峰值,但两种灰色关联度随故障类型的变化趋势却不同,比如 B 型灰色关联度从大到小的顺序依次为 $\xi_5 > \xi_4 > \xi_9 > \xi_1 > \xi_2 > \xi_7 > \xi_8 > \xi_6 > \xi_3$;而传统灰色关联度从大到小的顺序依次为 $\xi_5 > \xi_4 > \xi_9 > \xi_8 > \xi_1 > \xi_7 > \xi_6 > \xi_3 > \xi_2$ 。同样,由图 2 也可以看出,两种灰色关联度虽然均在 M4 处达到最大值,但是它们的值随故障类型的变化趋势也不同。这说明灰色关联分析在变压器故障识别中也存在一些问题,这可能是由于在计算关联度时是采用均值化方法,而没有考虑各种气体含量占总气体含量的权重造成的,显然各种气体对导致变压器产生故障是不同的。因此,将灰色关联分析法应用于变压器故障识别中,应在如何确定各气体含量的

权重等方面做进一步研究。

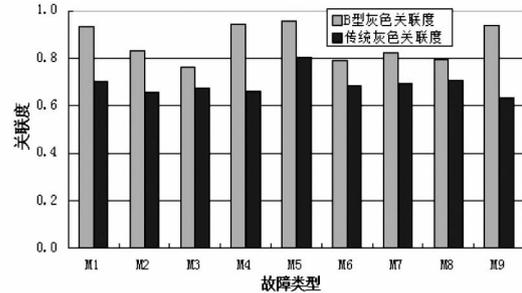


图 1 实例 1 中两种灰色关联度直方分布图

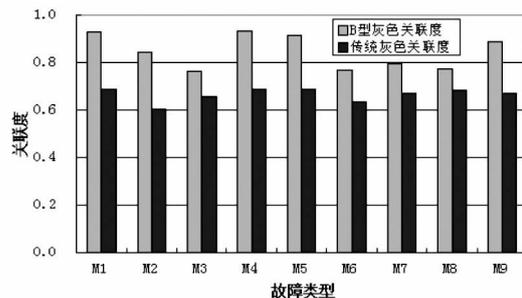


图 2 实例 2 中两种灰色关联度直方分布图

4 结 论

变压器的故障识别对于保障电力系统安全稳定运行非常重要,采取科学有效的方法对变压器的故障进行识别显得十分必要。这里重点探讨了传统灰色关联分析法和 B 型灰色关联分析法在变压器故障识别中的适用性。结果表明:

1) B 型灰色关联分析法和传统灰色关联分析法均能对变压器的故障进行识别,但相比而言,B 型灰色关联分析由于不仅考虑了子序列与母序列之间的相近性,还考虑了两者之间的相似性,使得 B 型灰色关联度高于传统的灰色关联度。这说明 B 型灰色关联分析在变压器故障识别中的适用性更强。

2) 在对 B 型灰色关联度与传统灰色关联度从大到小的排序中发现,虽然两者均在同一点达到最大值,但是两者随故障类型的变化趋势却不同。这可能是由于在计算关联度时采取均值化方法而没有采用加权法所造成的。因此,应对 DGA 所测得的各种气体含量占总气体含量的权重等方面进行进一步深入的研究。

参考文献

[1] S Singh, M N Bandyopadhyay. Dissolved Gas Analysis

Technique for Incipient Fault Diagnosis in Power Transformers: A Bibliographic Survey [J]. IEEE Electrical Insulation Magazine, 2010, 26(6): 41-46.

[2] Naveen Kumar Sharma, Yog Raj Sood, Rajnish Shrivastava. DGA Analysis of Transformer Oil with Experimental Investigation: An Effective Tool of Condition Monitoring for Power Transformer [J]. Journal of Power Electronics & Power Systems, 2015, 5(2): 9-16.

[3] 高文胜, 严璋. 谈克雄基于油中溶解气体分析的电力变压器绝缘故障诊断方法 [J]. 电工电能新技术, 2000, 19(1): 22-26.

[4] 张建文, 赵大光, 董连文. 基于模糊数学的变压器诊断专家系统 [J]. 高电压技术, 1998, 24(4): 6-8.

[5] 李硕, 赵峰. 基于熵权优化加权灰色关联度的变压器故障诊断方法 [J]. 变压器, 2013, 50(9): 48-51.

[6] 张吉林, 李守学, 邹姗姗. 基于灰色关联度的变压器故障诊断 [J]. 变压器, 2015, 43(1): 13-15.

[7] 段侯峰. 基于遗传算法优化神经网络的变压器故障诊断 [D]. 北京: 北京交通大学, 2008.

[8] 武中利, 杨建, 朱永利, 等. 基于粗糙集理论和支持向量机的变压器故障诊断 [J]. 电力系统保护与控制, 2010, 38(18): 80-82.

[9] 刘思峰, 郭天榜, 党耀国. 灰色系统理论及其应用 [M]. 北京: 科学出版社, 1999.

[10] 王清印. 灰色B型关联分析 [J]. 华中理工大学学报, 1989, 17(6): 77-82.

[11] 孙才新, 李俭, 郑海平. 基于灰色面积关联度分析的电力变压器绝缘故障诊断方法 [J]. 电网技术, 2002, 26(7): 24-29.

作者简介:

胡非(1985), 工程师、硕士研究生, 主要从事继电保护工作;
干磊(1983), 工程师、硕士研究生, 主要从事继电保护工作。
(收稿日期: 2016-06-14)

(上接第72页)

是 BPD2_OPEN_IND 输入信号的底层代码错误, 误将 BPD2 分位信号(PWPQ15_OP_IND) 定义为 BPD2 合位信号(PWPQ15_CL_IND) , 如图 7 所示。



图7 信号内部定义错误

根据上述现象分析, 故障原因为软件底层代码错误, 引起阀组连接线保护差动电流选择错误, 导致保护动作。

4 故障处理及建议

1) 经检查, 此特高压直流阀组连接线差动保护均存在 BPD2_OPEN_IND 信号与实际状态不符的情况, 如现场实际状态为分位, 但软件中信号为合位。建议直流控制保护供货厂家开发编译软件自检功能, 当信号实际输入与自定义输入出现差异时, 软件能够自动报警, 确保其余信号无类似问题。

2) 经南瑞集团检查确认, 现场软件中仅 BPD2_OPEN_IND 信号存在底层代码错误问题, 其他极控、阀控、极保护、阀保护等软件中均无类似错误。建议厂家在编写软件和自行监测过程中切实提高检查力度, 同时在出厂试验、现场调试中能够对软件进行全面的试验和检查。

参考文献

[1] 郑晓冬, 郗能灵, 杨光亮, 等. 特高压直流输电系统的建模与仿真 [J]. 电力自动化设备, 2012, 32(7): 10-14.

[2] 谢绍宇, 王秀丽, 王锡凡. 交直流混联系统可靠性评估 [J]. 电力自动化设备, 2011, 31(7): 10-16.

[3] 浙江大学发电教研组直流输电教研组编. 直流输电 [M]. 北京: 电力工业出版社, 1982.

[4] 赵晓君. 高压直流输电工程技术 [M]. 北京: 中国电力出版社, 2011.

[5] 刘振亚. 特高压直流输电技术研究成果专辑(2005年) [M]. 北京: 中国电力出版社, 2006.

[6] 国网运行分公司编组. 特高压直流换流站岗位培训教材: 二次系统 [M]. 北京: 中国电力出版社, 2012.

作者简介:

孙文(1980), 本科, 工程师, 研究方向为特高压直流输电技术;
禹佳(1983), 本科, 工程师, 研究方向为特高压直流输电技术;
闫礼阳(1968), 本科, 工程师, 研究方向为特高压直流输电技术。
(收稿日期: 2016-08-02)