

文章编号:1001-1609(2003)01-0030-04

一种基于粗糙集理论的电力变压器故障综合诊断方法

俞晓冬¹, 孙莹¹, 马铮²

(1.山东大学电气工程学院, 山东 济南 250061; 2.安丘电业公司, 山东 安丘 262100)

A SYNTHETIC DIAGNOSIS METHOD FOR ELECTRIC POWER TRANSFORMER FAULT BASED ON RS THEORY

YU Xiao-dong¹, SUN Ying¹, MA Zheng²

(1.Shandong University, Ji'nan 250061, China; 2.Anqiu Electric Power Company, Anqiu 262100, China)

摘要: 提出了一种基于粗糙集的理论对变压器故障性质和故障部位的综合诊断方法。它既充分利用了油中溶解气体的分析结果,又考虑了一些比较典型的影响因素,如某些电气试验结果和其它试验结果。由于利用了粗糙集理论的决策表约简技术,去除冗余信息,大大压缩了人工神经网络(ANN)的训练样本,从而有效地提高了ANN的训练速度和诊断的准确率。

关键词: 综合诊断; 故障部位; 粗糙集; 约简; 人工神经网络

中图分类号: TM855

文献标识码: A

Abstract: A synthetic fault diagnosis method based on RS theory for electric power transformer fault character and fault location is proposed. Both the DGA analysis results and some other typical factors such as electrical test results are fully considered. The training stylebook of ANN is compressed and the redundancy information is deleted by using decision table reduction technique of RS, thus the training speed and the accuracy of diagnosis are effectively improved.

Key words: synthetic diagnosis; fault location; RS(rough set); reduction; ANN

1 引言

变压器故障诊断方法近年来发展很快,其中以油中溶解气体分析(DGA)法应用最为广泛。但是,该方法在实际应用中存在着一些问题,如编码缺损、对轻微故障反映不灵敏等。随着人工智能技术的发展,人工神经网络强大的自学习能力和对非线性问题的处理能力,为电力变压器故障诊断开辟了新的途径。但人工神经网络输入的选取将影响网络诊断的准确率,输入空间越大,则网络学习越复杂,训练

时间越长。因此选择合适的输入空间对故障诊断是十分重要的。

电力变压器故障诊断可分为故障点性质和故障点部位的诊断。如何既能准确地判断出故障性质又能准确地判断出故障部位,是一个比较复杂的问题。

针对上述问题,结合粗糙集理论提出了一种基于粗糙集理论的电力变压器故障综合诊断方法。这种方法主要分为故障性质诊断和故障部位诊断两个模块。每一模块均与粗糙集理论相结合。在故障性质诊断模块中,粗糙集的应用有效地避免了罗杰斯比值法的编码缺损问题。在故障部位诊断模块中,把电气试验等各种试验结果与前一模块的输出结果一起作为决策表的条件属性,把各故障部位作为决策表的决策属性,对该原始决策表进行约简,作为ANN的训练样本集,大大降低了ANN的复杂性,减少了网络的训练时间,并提高了判断准确率。

2 粗糙集理论和决策表约简^[1]

粗糙集(RS)理论是一种刻划不完整性和不确定性的数学工具,能有效地分析和处理不精确、不一致、不完整等各种不完备信息,通过发现数据间隐藏的关系,揭示潜在的规律,从而提取有用的信息,简化信息的处理。

RS理论中应用决策表来描述论域中对象。它是一张二维表格,每一行描述一个对象,每一列描述对象的一种属性,属性分为条件属性和决策属性。论域中的对象根据条件属性的不同,被划分到具有不同决策属性的决策类。表1为一张决策表,论域 U 有8个对象,编号1~8, $\{a, b, c\}$ 是条件属性集, d 为决策属性。对于分类来说,并非所有的条件属性都是必要的,有些是多余的,去除这些属性不会影响原来的分类效果。约简定义为不含多余属性并保证分类正确

收稿日期:2002-09-10; 修回日期:2002-10-08

的最小条件属性集。一个决策表可能同时存在几个约简,这些约简的交集定义为决策表的核(core),核中的属性是影响分类的重要属性。

决策表约简步骤如下:①从决策表中去除冗余条件属性列。若删除某条件属性列后,剩余规则发生冲突,该条件属性列不可删除。如表1中:删除c列后,第6条规则与第7条规则矛盾,第5条规则与第8条规则也矛盾,所以条件属性c不可省略。同理,条件属性b也不可省略。而条件属性a可省略。表2为删除条件属性a后的约简{b,c}。②计算条件属性核值。有 $core(b)=\{1,2,4,5,7\}$, $core(c)=\{5,6,7,8\}$ 。见表3。③决策规则简化。将相同的规则合并,得到最小决策,见表4。

表1 原始决策表

U	a	b	c	d
1	1	0	0	d ₁
2	0	0	0	d ₁
3	0	0	1	d ₁
4	0	1	0	d ₂
5	1	2	0	d ₂
6	0	2	1	d ₁
7	0	2	0	d ₂
8	1	2	1	d ₁

表2 消除冗余属性

U	b	c	d
1	0	0	d ₁
2	0	0	d ₁
3	0	1	d ₁
4	1	0	d ₂
5	2	0	d ₂
6	2	1	d ₁
7	2	0	d ₂
8	2	1	d ₁

表3 核值表

U	b	c	d
1	0	*	d ₁
2	0	*	d ₁
3	*	*	d ₁
4	1	*	d ₂
5	2	0	d ₂
6	*	1	d ₁
7	2	0	d ₂
8	*	1	d ₁

表4 最小决策表

U	b	c	d
2	0	0	d ₁
4	1	0	d ₂
5	2	0	d ₂
6	2	1	d ₁

“约简”和“核”这两个概念很重要,是RS方法的精华。RS理论提供了搜索约简和核的方法。计算约简的复杂性随着决策表的增大呈指数增长,当然实际中没有必要求出所有的约简。引入启发式的搜索方法,如遗传算法有助于找到较优的约简,即所含条件属性最少的约简。

3 基于RS理论的变压器故障综合诊断

对于变压器故障性质的诊断已经研究得比较多,而变压器故障部位的诊断仍比较复杂。如图1所示,当根据DGA法分析认为可能存在内部故障时,还应结合电气试验结果、特征气体、运行检修史,以及外部检查等有效信息进行综合诊断。这样,不仅有助于明确判断故障类型,而且也有利于对故障部位进行准确定位。把油中气体分析结果与电气试验结果、其它有效信息结合起来,充分利用历史数据对故障部位进行诊断^[2,3]。

判断有无故障时,可对照油中溶解气体含量注

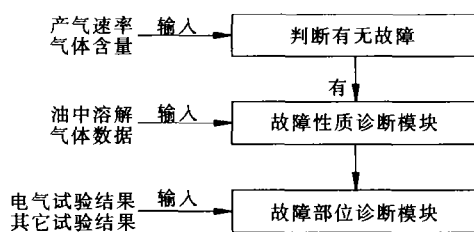


图1 变压器综合诊断框图

意值和产气速率注意值。若气体含量与产气速率均大于注意值,则可判断为有故障发生。

3.1 故障性质诊断模块

故障性质的诊断方法很多,可以采用传统的三比值法,也可以采用神经网络等方法。考虑到综合诊断方法的一致性与连贯性,倾向于采用文[4]提出的基于粗糙集理论的故障性质诊断方法,该方法在变压器历史数据所形成的决策表的基础上,建立了不同简化层次上的知识库,克服了传统判断方法的编码缺损缺点,即使在气相色谱分析数据不完备的情况下,也能得到正确的诊断结果。

该模块的输出为各种故障性质,如正常老化、局部放电、过热、电弧放电等。然后把这些输出分放电性故障和过热性故障两类,以此作为下一个模块(故障部位诊断模块)的部分输入。

3.2 故障部位诊断模块^[5,6]

这里,把ANN与粗糙集理论的决策表约简技术结合起来,共同完成对故障部位的诊断。

故障部位的确定是一个非常复杂的问题,仅依靠油中气体分析的结果是难于作出故障定位的,一般可根据导电回路和磁路产气特征的某些差异来推导故障点是在导电回路还是在磁路部分,例如:故障在导电回路时,往往有C₂H₂且含量较高,C₂H₄/C₂H₆比值也较高,并且C₂H₄的产气速率往往高于CH₄的产气速率。对于磁路故障,一般无C₂H₂,或者很微小(一般只占氢烃总量的2%以下),而且C₂H₄/C₂H₆比值较小,通常该比值小于6。对于固体绝缘部分故障,CO与CO₂产气速率均大于正常值。对于故障部位的估计主要还结合运行检修情况调查和其它试验结果进行综合判断。

综合以上各因素,对于条件属性集,取C₂H₂含量、C₂H₄/C₂H₆比值、CO产气速率、CO₂产气速率、铁心绝缘电阻、变压比试验、油中微水含量、三相不平衡系数、单相空载试验,再加上故障性质诊断模块的输出等11项一起作为故障部位诊断原始决策表的条件属性集C={c_i}。

变压器故障部位的分类,应结合大量文献、历史

故障与专家经验进行。笔者将故障部位归纳总结为导电回路、磁路部分、固体绝缘部分。其中导电回路又可分为分接开关故障、绕组导线故障、引线故障。磁路部分可分为铁心故障与夹件故障。固体绝缘部分可分为匝间短路、引线绝缘故障等。总之,把分接开关、绕组导线、引线、铁心、夹件、匝间短路、引线绝缘 7 项故障作为故障部位诊断原始决策表的决策属性集 $D=\{d_j\}$ 。见表 5。

表 5 故障部位诊断原始决策表

样 本	条件属性集 $C=\{c_i\} (i=1\sim 11)$						
	c_1	c_2	c_3	c_4	c_5	c_6	c_7
1	1	1	1	0	0	1	*
2	...	...	...	...	...	...	...
3	1	0	1	1	0	*	*
...

样 本	条件属性集 $C=\{c_i\} (i=1\sim 11)$				决策属性集 $D=\{d_j\} (j=1\sim 7)$
	c_8	c_9	c_{10}	c_{11}	d_j
1	1	1	0	1	d_1
2	...	...	...	...	...
3	0	0	0	1	d_4
...

表 5 中决策属性集 D 的各项内容定义如下: d_1 表示分接开关故障, d_2 表示绕组导线故障, d_3 表示引线故障, d_4 表示铁心故障, d_5 表示夹件故障, d_6 表示匝间短路, d_7 表示引线绝缘故障。

表 5 中条件属性集 C 的各属性内容与表 6 中数值含义见表 6。

表 6 条件属性集 $\{c_i\}$ 的取值及含义

条件属性	定义	取值	含义
c_1	C_2H_2 含量占氢炔总量	0	<2%
		1	>2%
c_2	C_2H_4/C_2H_6	0	<6
		1	>6
c_3	CO 产气速率	0	<正常值
		1	>正常值
c_4	CO ₂ 产气速率	0	<正常值
		1	>正常值
c_5	铁心绝缘电阻	0	正常
		1	异常
c_6	变压比试验	0	
		1	
c_7	油中微水含量	0	
		1	
c_8	三相不平衡系数	0	合格
		1	不合格
c_9	单相空载试验	0	无显著变化
		1	有显著变化
c_{10}	放电性故障	0	否
		1	是
c_{11}	过热性故障	0	否
		1	是

充分利用历史故障数据,可得到一个复杂的原始决策表,它比较全面具体地描述了故障部位与各

种条件属性之间的关系,但是如果把它作为 ANN 的训练样本集,则显得过于庞大,会使 ANN 学习系统过于复杂,训练时间过长。因此,利用粗糙集理论的决策表约简知识把表 5 进行约简,在保持与原始决策表相同分类效果的前提下对数据进行化简,并求得知识的最小表达,即最小决策表。通过去掉冗余属性,可大大简化知识的表达空间维数,简化了训练样本集。同时神经网络对输入的每一个训练集采用反向传播(BP)算法。这样大大压缩了 ANN 的训练样本集,有效地提高了 ANN 的训练速度。故障部位诊断模块的流程见图 2。

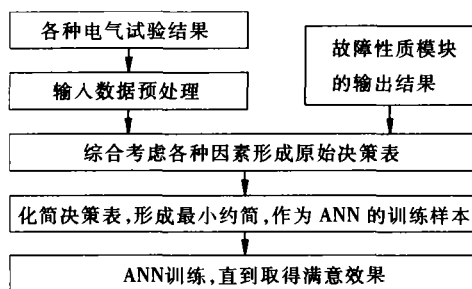


图 2 故障部位诊断模块的流程

采用上述方法,收集了山东电网多台变压器的历史故障数据,考虑 15 种不同的故障类型,共得到 100 个训练样本。随机抽取 80 个样本训练 ANN,其余 20 个用来测试。特征输入为 11 个,见表 5。应用粗糙集约简技术进行决策表约简。试验结果表明,约简后的 ANN 训练数据集被压缩了 35%,压缩后的 ANN 判别准确率没有下降,且压缩后的 ANN 训练速度有明显提高。

另外,该系统也是一个开放式的系统,有用的信息可以不断加入系统中,表 5 所示的原始决策表可以根据新的故障数据和不断的经验积累逐步地加以完善并修改,以使整个模块更加成熟,诊断更加准确。

4 实例分析

某电厂 SFSL-60000/110 型主变油中气体分析结果如下 C_2H_4 :5 506 ppm, C_2H_2 :7 ppm, C_2H_6 :1 779 ppm, CH_4 :6 632 ppm, H_2 :1 430 ppm,总烃产气速率 7.7 mL/h。其它试验结果如下:最大相间不平衡系数在低压侧为 1.55%,合格;绝缘试验合格;单相空载试验与历史数据相比无显著变化,CO,CO₂ 产气速率较高,大于注意值。诊断:① 总烃产气速率 7.7 mL/h,远大于注意值,有严重故障。② 首先对油中气体分析结果进行数据预处理,得到 $C_2H_2/C_2H_4 \approx 0$, $CH_4/H_2 \approx 2$, $C_2H_4/C_2H_6 \approx 2$, $C_2H_6/CH_4 \approx 0$,编码为 2,0,2,0,把这些

数据输入故障性质诊断模块,输出故障性质为高温过热故障。③ C_2H_2 含量占氢烃总量:7/15 354=0.05%<2%, $c_1=0$; $C_2H_4/C_2H_6=5 506/1 779=3.09<6$, $c_2=0$; CO产气速率大于注意值, $c_3=1$; CO_2 产气速率大于注意值, $c_4=1$;绝缘试验合格, $c_5=0$;三相不平衡系数合格, $c_6=0$;单相空载试验无显著变化, $c_9=0$;故障性质为过热性故障, $c_{10}=0$, $c_{11}=1$ 。

把这些数据输入故障部位诊断模块,输出结论为铁心故障。实际吊罩检查发现,铁心上轭铁两点接地,过热烧伤面积 28×11 ,证实了诊断的准确性。

5 结论

由于综合考虑了油中气体分析结果与电气试验结果以及其它有效信息,因此故障诊断更加准确。并充分利用粗糙集理论约简原始决策表,去除其中的冗余信息,对ANN训练样本进行了有效的简化,大大降低了神经网络构成系统的复杂性,也减少了网络的

训练时间。既完成了对故障性质的诊断,又完成了对故障部位的诊断。试验证明了该方法的有效性。

参考文献:

- [1] 曾黄麟. 粗糙集理论及其应用[M]. 重庆: 重庆大学出版社, 1998.
- [2] 操敦奎. 变压器油中气体分析与诊断[R]. 中国水利电力企业管理协会, 1987.
- [3] 钱政, 严璋. 结合多元统计分析的神经网络在变压器故障诊断中的应用[J]. 变压器, 2000(4):338-342.
- [4] 束洪春, 孙向飞, 司大军. 电力变压器故障诊断专家系统知识库建立和维护的粗糙集方法[J]. 中国电机工程学报, 2002(2): 31-35.
- [5] 谢克明, 杨静. 粗糙集理论及其在智能控制领域的应用前景[J]. 太原理工大学学报, 1999(7):338-342.
- [6] J Jelonek, et al. Rough Set Reduction of Attributes and Their Domains for Neural Networks[J]. Computational Intelligence, 1995, 11(2): 339-347.

作者简介:俞晓冬(1974-),女,硕士研究生,主要研究方向为电力系统的运行与控制。

(上接第26页)中, d_1, d_2, d_3, d_4 分别为第1,2,3,4层分解的高频分量,而 a_4 为第4层分解的低频分量。所使用的阈值是利用式(3)选择的。由图3可见,利用所选阈值提取的局放波形能真实地反映放电性质。

5 结论

利用开环去噪算法中的小波去噪法可有效地实现局放脉冲与噪声分离。它是以前先知道局放信号和噪声信号的特点为前提的。小波去噪的有效性取决于小波的类型、阈值以及分解层数。实践证明,利用最佳小波选择法、自动阈值选择法选定的小波和阈值来处理局放信号时,能取得很好的去噪效果。

参考文献:

- [1] I Shim, et al. Detection of PD Utilizing Digital Signal Processing Methods, Part 3: Open-loop Noise Reduction [J]. IEEE Electrical Insulation Magazine, 2001, 17(1): 6-12.
- [2] 胡昌华. 基于MATLAB的系统分析与设计——小波分析[M]. 西安: 西安电子科技大学出版社, 1999.
- [3] Ma X., et al. Automated Wavelet Selection and Thresholding for PD Detection [J]. IEEE Electrical Insulation Magazine, 2002, 18(2): 37-45.

作者简介:朱周侠(1977-),女,硕士研究生,主要从事局放电检测方面的研究。

(上接第29页)

通过计算机仿真和试验,验证了智能控制的正确性,并成功地在断路器上进行了操作试验。通过对合分闸线圈中电流波形的分析,给出了电子开关控制切断合分闸线圈电流的较合理的时间范围为操动机构停止运动后的10ms内。

参考文献:

- [1] A J W Lammers, P P Leufkens, G C Shoonenbery. MV Vacuum Switchgear Based on Magnetic Actuators [A]. IEE Conference

- Publication[C], No. 459, 1998.
- [2] 游一民,郑军,罗文科. 永磁机构及其发展动态[J]. 高压电器, 2001, 37(1): 44-47.
- [3] B A R McKeane, Dr. C Reuber. Magnets & Vacuum: The Perfect Match[A]. IEE Conference Publication[C], No. 459, 1998.
- [4] 宋万杰,罗丰,吴顺君. CPLD技术及其应用[M]. 西安: 西安电子科技大学出版社, 1999.

作者简介:张俊民(1962-),男,博士,高工,从事高压电器等电力设备的数值分析、控制、故障检测与诊断等研究工作。

欢迎投稿! 欢迎订阅! 欢迎评刊! 欢迎刊登广告!